

KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

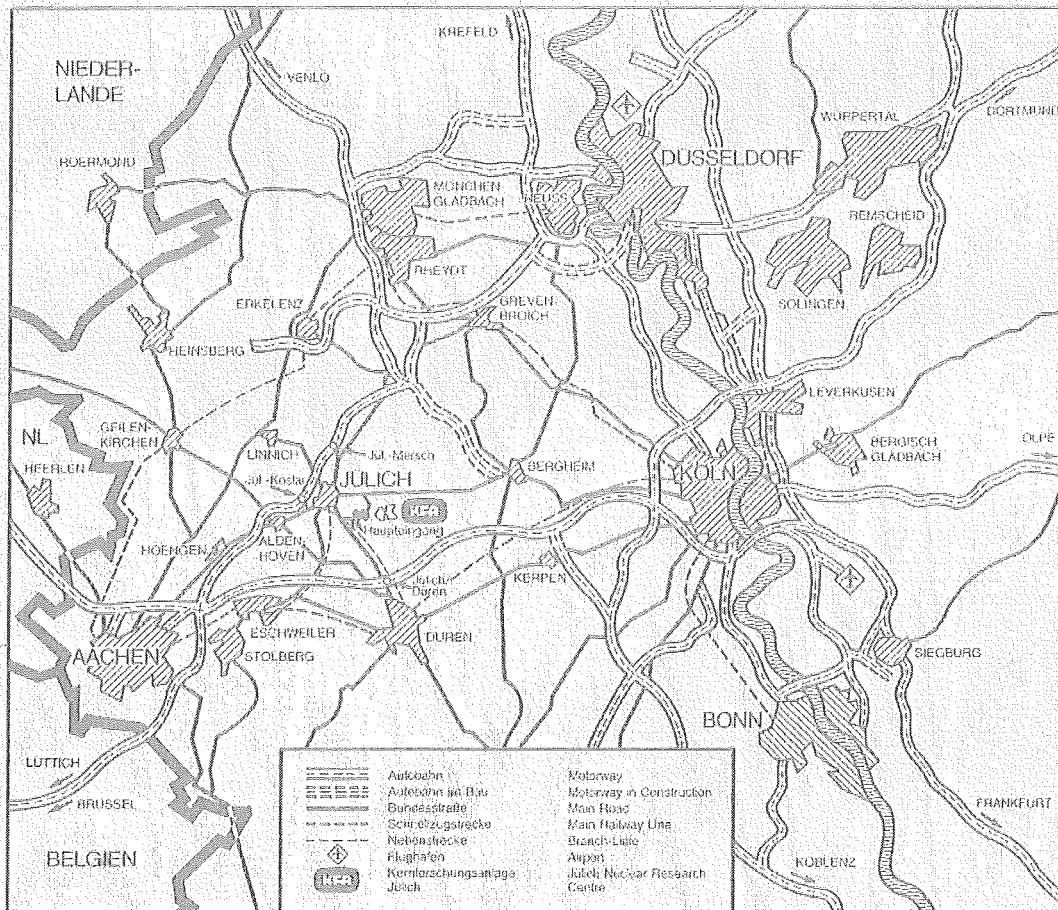
Technische Dienste - Mechanische Werkstätten

**Entwicklung und Auslegung eines
Ultrahochvakuum-Manipulators
mit fünf Freiheitsgraden**

von

H. Kriechel

Jül - Spez - 285
Januar 1985
ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 285

Technische Dienste – Mechanische Werkstätten Jül – Spez - 285

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

Entwicklung und Auslegung eines Ultrahochvakuum-Manipulators mit fünf Freiheitsgraden

von

H. KriecheI

Inhaltsverzeichnis

1	<i>EINLEITUNG</i>	1
1.1	<i>Verwendung und Einsatzgebiet der Apparatur</i>	1
1.1.1	<i>Physikalische Grundgedanken</i>	1
1.1.2	<i>Kurze Beschreibung des Experiments</i>	1
1.2	<i>Genaue Problemstellung</i>	4
1.3	<i>Eingliederung der Apparatur in bereits vorhandene Geräte und Anordnungen</i>	8
2	<i>ENTWURF DER APPARATUR</i>	11
2.1	<i>Lösungsmöglichkeiten zur Realisierung der gewünschten Funktionen</i>	11
2.2	<i>Beschreibung und Begründung der gewählten Lösung</i>	19
2.2.1	<i>Realisierung der Translationsbewegungen in X- und Y-Richtung</i>	19
2.2.2	<i>Ausführung der drei Rotationsbewegungen</i>	20
2.2.3	<i>Übertragung der Rotationsbewegungen von den Drehdurchführungen</i>	21
2.2.4	<i>Realisierung der Kühleinrichtung für die Probe</i>	22
2.3	<i>Prinzipieller Aufbau des Manipulators unter Berücksichtigung der gegebenen Abmessungen und Platzverhältnisse sowie der besonderen Betriebsbedingungen</i>	22
3	<i>KONSTRUKTION</i>	27
3.1	<i>Unterteilung des Manipulators in Funktionsgruppen</i>	27
3.2	<i>Beschreibung der einzelnen Funktionsgruppen</i>	27
3.2.1	<i>Probenhalter mit Heizung und externem Kaltkopf</i>	27
3.2.1.1	<i>Anforderungen</i>	27
3.2.1.2	<i>Beschreibung des Lösungsweges</i>	28
3.2.1.3	<i>Ausgeführte Lösung</i>	31
3.2.1.4	<i>Konstruktionstechnische Aspekte</i>	32
3.2.1.5	<i>Vakuum- und Kryotechnische Gesichtspunkte</i>	33
3.2.1.6	<i>Berechnungen</i>	35
3.2.1.7	<i>Auswahl der Werkstoffe und Beistellteile</i>	37
3.2.1.8	<i>Anmerkungen für Fertigung und Montage</i>	38
3.2.2	<i>Tilt-Mechanismus und Seilrollenführung</i>	41
3.2.2.1	<i>Geforderte Funktion</i>	41
3.2.2.2	<i>Gestaltung der Seilführung</i>	41
3.2.2.3	<i>Theoretische Grundlagen der Viergelenkkette</i>	43
3.2.2.4	<i>Beschreibung der verwendeten Lösung</i>	44
3.2.2.5	<i>Auswahl der Werkstoffe und Beistellteile</i>	47
3.2.2.6	<i>Anmerkungen zu Fertigung und Montage</i>	49
3.2.3	<i>Führungsrohr mit Übertragungselementen für Rotationen</i>	49
3.2.3.1	<i>Aufgabe der Baugruppe</i>	49
3.2.3.2	<i>Beschreibung</i>	50
3.2.3.3	<i>Berechnung</i>	51
3.2.3.4	<i>Werkstoffe, Beistellteile und deren Bezugsquellen</i>	52
3.2.4	<i>Getriebekasten für Rotationen</i>	52
3.2.4.1	<i>Geforderte Funktionen</i>	52
3.2.4.2	<i>Beschreibung der Baugruppe</i>	53
3.2.4.3	<i>Berechnungen</i>	57

3.2.4.4	Werkstoffe, Beistellteile und Bezugsquellen	70
3.2.5	Kreuzführung für Translationen mit Membranbalg	71
3.2.5.1	Geforderte Funktion	71
3.2.5.2	Anmerkungen zur Aufgabenstellung	71
3.2.5.3	Beschreibung der Funktionsgruppe	72
3.2.5.4	Berechnungen	74
3.2.5.5	Werkstoffe, Beistellteile und Bezugsquellen	81
3.2.6	Zu- und Ableitungen für Betriebsmittel mit Vakuum-	
	Durchführungen	82
3.2.6.1	Anforderungen	82
3.2.6.2	Ausführung	82
3.2.6.3	Berechnung	83
3.2.6.4	Werkstoffe, Beistellteile und Bezugsquellen	85
4	MONTAGEANLEITUNG FÜR DIE GESAMTE APPARATUR	86
5	AUSHEIZANWEISUNG	89
6	LITERATURHINWEISE	
6.1	Lehrbücher und Nachschlagwerke	90
6.2	Vorlesungen, Seminare, Zeitungsaufsätze	90
6.3	DIN-Normen	91
6.4	Firmenprospekte	91

EINLAGEN

zu Kap. 1.3:

Zeichnung Nr. 246.39.11.80.08 "Hubvorrichtung für Molekularstrahl-Apparatur"

zu Kap. 2.3:

Zeichnung Nr. 246.01.01.83-P "UHV-Manipulator"

Zeichnung Nr. 246.01.01.83 "UHV-Manipulator"

mit Positionsliste

zu Kap. 3.2.1:

Zeichnung Nr. 246.01.01.83-01 "Probenhalter"

mit Positionsliste

zu Kap. 3.2.2:

Zeichnung Nr. 246.01.01.83-02 "Tilt-Mechanismus und Seilführung"

zu Kap. 3.2.5:

Zeichnung Nr. 246.01.01.83-03 "Kreuzschlitten"

Konstruktionszeichnungen im Originalmaßstab siehe Zeichnungsband.

1 EINLEITUNG

1.1 Verwendung und Einsatzgebiet der Apparatur

1.1.1 Physikalische Grundgedanken

Wechselwirkungsvorgänge und Reaktionen zwischen Gasmolekülen und Festkörperoberflächen spielen in der Vakuumphysik eine bedeutende Rolle. Neben dem Einfluß, den sie auf technische Anwendungen ausüben, sind sie auch Gegenstand der Grenzflächenforschung.

Es handelt sich im wesentlichen um folgende Vorgänge: Gasmoleküle werden an Festkörper-Oberflächen adsorbiert, d.h. sie werden durch die Wirkung Van der Waalscher Bindungskräfte oder durch chemische Reaktionen aller Art an der Oberfläche festgehalten.

Abhängig von Temperatur und Druck können sich die Gasmoleküle von der Wand auch wieder lösen. Diesen Effekt bezeichnet man mit Desorption. Diffundieren die Moleküle in den Festkörper ein und setzen sich dort auf Fehlstellen oder Zwischengitterplätze, so spricht man von Absorption. Durch gezielte Beobachtung von Ad- und Desorptionsvorgängen an Oberflächen kann man Informationen über die Struktur der Oberfläche gewinnen.

1.1.2 Kurze Beschreibung des Experiments

Zur Untersuchung von Wechselwirkungsvorgängen, zwischen Gasmolekülen und Festkörperoberflächen, werden im Institut für Vakuumphysik und Grenzflächenforschung der Kernforschungsanlage Jülich Experimente mit einem Molekularstrahl durchgeführt. Dabei sollen unter anderem Vorgänge, die bei Korrosion und Katalyse ablaufen, erforscht werden. Ziel dieser Arbeiten ist es, langfristig neuartige Katalysatoren für verschiedene Reaktionsabläufe zu entwickeln.

Der Molekularstrahl besteht aus ungeladenen Teilchen, die eine stark gerichtete Bewegung ausführen. Er wird folgendermaßen erzeugt:

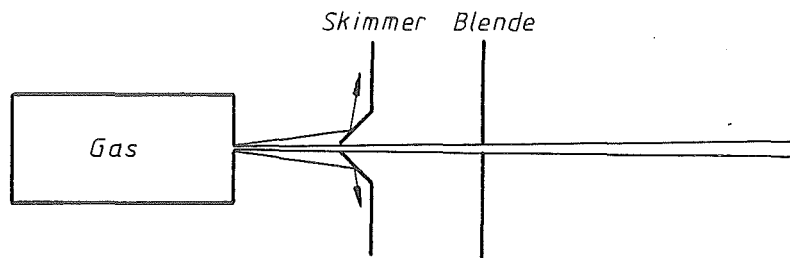


Abb. 1: Erzeugung des Molekularstrahls

In einer Kammer befindet sich ein Gas, z.B. Helium oder Wasserstoff, unter einem Druck von 1 bis 5 bar. Dieses strömt durch eine Öffnung, mit einem Durchmesser von etwa 30 μm , in einen Raum, in dem ein Druck von $<10^{-3}$ mbar herrscht. Beim Austritt der Moleküle werden, bis auf eine, alle ihre Bewegungen "eingefroren", so daß ein stark gerichteter Strahl aus Gasmolekülen entsteht. Nach weiterem Ausblenden hat der Strahl schließlich einen Divergenzwinkel von etwa 1° .

Die Temperatur des Gases in der Kammer, im Bereich 100 bis 700 K, bestimmt die Teilchengeschwindigkeit. Die Strahlenergie beträgt 20 bis 300 meV.

Das Experiment läuft im Prinzip so ab, daß der Molekularstrahl unter einem bestimmten Winkel auf die Probenoberfläche trifft. Er wird dort gebeugt oder reflektiert und gelangt anschließend in einen Detektor, in diesem Falle ein Quadrupol-Massenspektrometer.

Mit dieser Anordnung können nun folgender Versuche durchgeführt werden:

Beim Beugungsexperiment verwendet man einen Strahl aus He-Atomen und H_2 -Molekülen. Die Teilchen treffen auf das Oberflächengitter der Probe und werden dort gebeugt. Sie "sehen" dabei eine zweidimensionale Anordnung, denn sie können aufgrund ihrer geringen Energie (meV-Bereich) nicht in das Kristallgitter eindringen.

Der Detektor spricht auf die Intensität des nach der Beugung bei ihm ein treffenden Strahls an. Das Beugungsbild gibt Aufschluß über Oberflächen-gitteraufbau, Fehlstellen, Diffusionen und Ordnungseffekte. Zum Ausmessen eines vollständigen Beugungsbildes muß die Probe um drei Achsen gedreht werden können, weil der Strahl in alle Richtungen gebeugt wird.

Bei der Untersuchung von Oberflächenreaktionen kommen Molekularstrahlen verschiedener Gase zur Anwendung: z.B. CO , CO_2 , O_2 , H_2 und komplexere Ver-

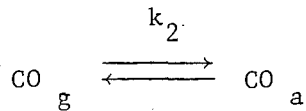
bindungen: CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 usw. Die Auswertung des gestreuten Strahls im Detektor erfolgt bezüglich der Massen, wobei das Verhältnis q/m aufgenommen wird. Gemessen wird die Verweilzeit der Moleküle auf der Oberfläche. Mit Hilfe von Chopper-Einrichtungen vor und hinter der Probe wird die Laufzeit des Strahls bestimmt. Durch Änderung des Abstandes zwischen Probe und Detektor sind in Verbindung mit den Choppern auch Geschwindigkeitsverteilungen im Molekularstrahl meßbar.

Eine Oberflächenreaktion kann, wie am Beispiel Sauerstoff und Kohlenmonoxid gezeigt, ablaufen:



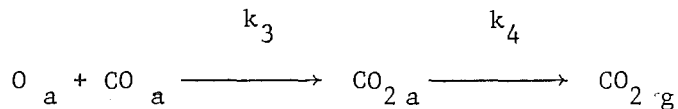
Reaktionskonstante k_1 folgt aus der Verweilzeitmessung. Ein O_2 -Strahl wird ausgesendet. Bei einer CO-Belegung der Platinprobe durch Einlaß von Kohlenmonoxid-Gas (Druck 10^{-6} mbar) wird im Detektor desorbiertes Sauerstoff gemessen.

II.



Reaktionskonstante k_2 folgt aus der Verweilzeitmessung. Ein CO-Strahl wird ausgesendet. Bei einer Sauerstoffbelegung durch O_2 -Gaseinlaß wird im Detektor CO gemessen.

III.



k_3 und k_4 folgen aus der Verweilzeitmessung. Zwischen den adsorbierten Gasen kommt es zur Oberflächenreaktion, bei der sich Kohlendioxid bildet. Bei einem O_2 -Strahl und einer CO-Begasung oder bei einem CO-Strahl und einer O_2 -Begasung kann im Detektor desorbiertes CO_2 gemessen werden.

Der Detektor ist nicht drehbar. Deshalb müssen zur Messung von Winkelabhängigkeiten der Streuprozesse die Probe und die Strahlkanone drehbar angeordnet sein. Damit der Schnittpunkt zwischen Strahlachse und Detektorachse

genau auf die Manipulatorachse eingestellt werden kann, ist eine X-Y-Vorstellung am Manipulator erforderlich, deren Genauigkeit besser als 0,1 mm sein soll. Mit der gleichen Genauigkeit ist die Probenoberfläche auf die Manipulatorachse einzurichten.

Um auch Untersuchungen in Abhängigkeit von der Temperatur durchführen zu können, sind Heiz- und Kühleinrichtungen für die Probe vorzusehen. Das Aufheizen der Probe geschieht über Wärmestrahlung und Elektronenbombardement. Zur Reinigung der Probe muß kurzzeitig eine Temperatur von 1200 °C erreicht werden. Bei der Kühlung sollten Temperaturen bis etwa 100 K eingestellt werden können.

Innerhalb der Molekularstrahl-Apparatur befinden sich noch einige Zusatzgeräte. Eine Argon-Kanone dient zur Reinigung der Probenoberfläche durch Beschuß mit Ar^+ -Ionen.

Die Einrichtungen "LEED" und "Auger" dienen zur Kontrolle der Oberfläche. Mit "LEED" (Low Energy Electron Diffraction) kann überprüft werden, ob die Oberfläche eine geordnete Struktur hat, und das ermöglicht es, diese Oberfläche mit anderen Experimenten zu vergleichen. Das Gerät befindet sich innerhalb der Apparatur auf einer anderen Ebene. Deshalb ist eine Verschiebung der Probe in vertikaler Richtung (Z) über einen Bereich von 250 mm erforderlich.

Mit "Auger" wird die Oberflächenreinheit geprüft. Die Identifizierung von Fremdatomen erfolgt dabei durch Messung der bei Elektronensprüngen freiwerdenden Energie, die bei jedem Element charakteristisch ist.

1.2 Genaue Problemstellung

Die Aufgabe bestand nun darin, ein Gerät zu entwickeln, das es ermöglicht, eine Probe in einer Ultrahochvakuum-Apparatur reproduzierbar um drei zueinander senkrecht stehende Achsen zu drehen und in drei senkrecht stehenden Ebenen zu verschieben. Der Schnittpunkt der drei Achsen muß genau im Zentrum der Probe liegen. Sind alle Translationseinrichtungen in Nullstellung, so trifft auch der Molekularstrahl genau im Zentrum der Probe auf.

Die Bedienung des Gerätes erfolgt von außen. Dabei werden die Bewegungen über Drehdurchführungen und Einstellmikrometer ins Vakuum übertragen. Die Möglichkeit des Schrittmotor-Antriebes sollte vorgesehen werden. Alle ein-

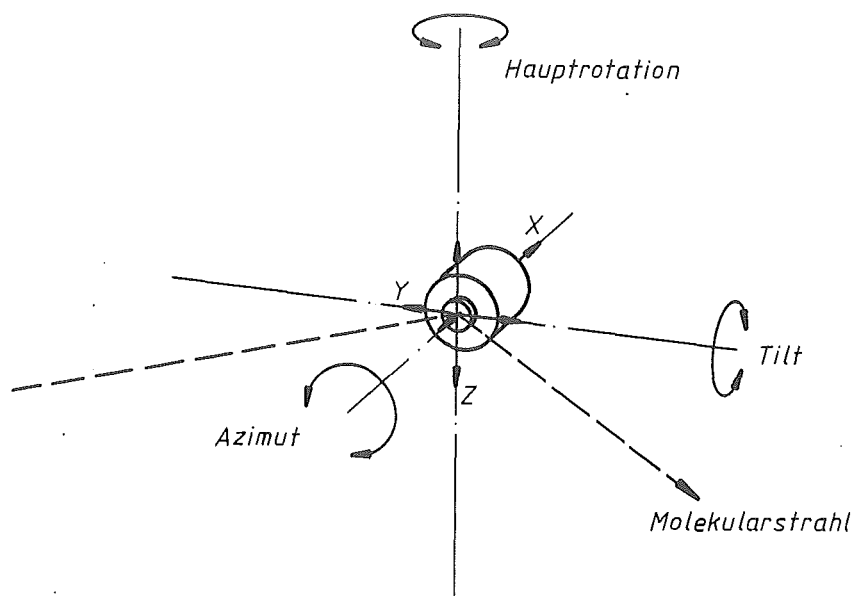


Abb. 2: Bewegungsmöglichkeiten der Probe

zernen Bewegungen müssen unabhängig voneinander erfolgen, eine gegenseitige Beeinflussung ist nicht erwünscht.

Die nachfolgende Benennung der Rotationsbewegungen wird in den weiteren Ausführungen beibehalten. Die Drehung um die Z-Achse heißt Hauptrotation ϕ_1 . Die Z-Achse steht senkrecht zur Ebene des Molekularstrahls. Mit Hilfe der Rotation ϕ_2 kann die senkrecht zur Ebene des Strahls stehende Probe gekippt werden (kippen, schrägstellen, neigen = engl.: tilt). Die Rotation um die Y-Achse heißt Tiltbewegung. Die Rotation ϕ_3 heißt Azimut-Bewegung (vgl. Astronomie: Der Azimut-Winkel entspricht den geographischen Längengeraden; Messung entlang des Horizonts). Die Bezeichnungen wurden vom Anwender der Apparatur übernommen.

Aus den Erfordernissen des Experimentes und den Abmessungen der Probe ergeben sich nun folgende Einstellbereiche der einzelnen Bewegungen: Für die Hauptrotation ist ein Bereich von $\pm 135^\circ$ mit einer Einstellgenauigkeit von $0,1^\circ$ erforderlich. Mit diesem großen Winkel kann die Probe auch auf zusätzliche Experimente, deren Vorrichtungen an anderer Stelle innerhalb der Apparatur liegen, justiert werden.

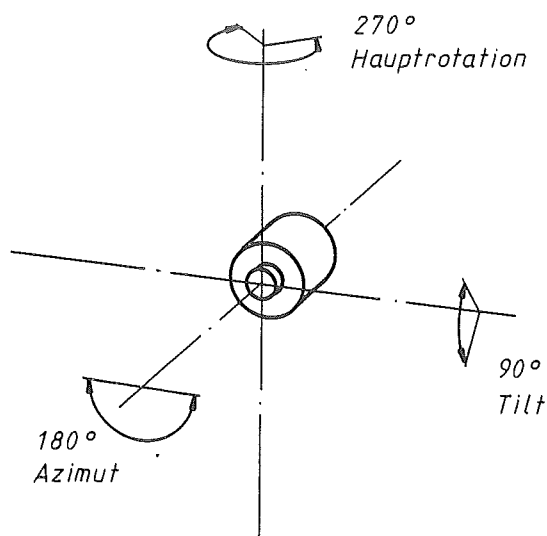


Abb. 3: Einstellwinkel der Rotationsbewegungen

Für die Tiltbewegung ist ein Einstellbereich von $\pm 45^\circ$, Genauigkeit $0,1^\circ$, und für die Azimut-Bewegung ein Bereich von $\pm 90^\circ$, Genauigkeit 1° , vorzusehen.

Die Verschiebung der Probe in X- und Y-Richtung soll $\pm 12,5$ mm mit einer Einstellgenauigkeit von $0,1$ mm betragen. Für die Translation entlang der Z-Achse ist ein großer Einstellbereich von ± 125 mm nötig.

Im Institut ist jedoch bereits eine Hubvorrichtung vorhanden, die - zwischen Molekularstrahl-Apparatur und UHV-Manipulator montiert - den gesamten Manipulator entlang der Z-Achse mit der gewünschten Einstellgenauigkeit $0,1$ mm verschieben kann. Auf eine Realisierung der Z-Translation kann aus diesem Grunde verzichtet werden, so daß sich die Aufgabenstellung auf ein Gerät mit fünf Freiheitsgraden (3 Rotationen, 2 Translationen) begrenzt.

Für das Experiment werden jedoch noch weitere Bedingungen gestellt: Die Probe soll gekühlt werden. Durch Wärmeableitung ist eine Temperatur von $77 - 100$ K zu erzielen. Außerdem muß in der Nähe der Probe eine Heizung vorgesehen werden, mit der die Probe kurzzeitig auf 1500 K erwärmt werden kann. Diese Heizung ist im Prinzip ein Tantal-Wendel, die Heizenergie durch Wärmestrahlung und thermische Emission von Elektronen abgibt. Die elektrische Betriebsspannung beträgt maximal 1000 V. Die Heizung muß so montiert sein, daß sie den Molekularstrahl nicht behindert.

Bei der Realisierung der genannten Aufgaben ist grundsätzlich zu beachten, daß der Einsatzbereich des Gerätes im Ultrahochvakuum liegt. Daraus ergeben sich weitere Anforderungen. Der Druckbereich beträgt 10^{-7} bis 10^{-11} mbar. Man kann in diesem Bereich nicht mehr von dem Medium Gas sprechen, sondern man muß diesen Zustand als eine Menge von Einzelteilchen (Atome und Moleküle) betrachten. Die Teilchendichte ist so klein, daß eine Beeinflussung untereinander, z.B. durch Zusammenstöße, fast nicht mehr vorkommt. Die mittlere freie Weglänge, also die mittlere Strecke, die ein Teilchen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zusammenstößen durchfliegt, ist größer als die Abmessungen der Apparatur sind. Für das Verhalten von Gasteilchen sind also nur Wechselwirkungen mit der Wand maßgebend. Adsorption und Desorption der Teilchen an den Wänden der Apparatur bestimmen den Enddruck, das Verhalten des Volumengases spielt keine Rolle.

Für die Apparatur dürfen nur Werkstoffe verwendet werden, die den Anforderungen des Ultrahochvakuums genügen. Sie müssen UHV-dicht, also gasundurchlässig, temperatur- und korrosionsbeständig sein und ausreichende mechanische Festigkeit haben. Es werden hohe Anforderungen an die Qualität der Halbzeuge gestellt. Lunker, Doppelungen und andere Fehlerstellen sind Ursache von Lecks und Gastaschen, die nur schwer aufzufinden sind, jedoch den Enddruck einer Apparatur empfindlich beeinflussen können. Schweißnähte sind so anzuordnen, daß Gaseinschlüsse grundsätzlich verhindert werden. Nur spezielle Schweißverfahren können angewendet werden: Wolfram-Elektroden-Inertgas-Methode; Plasma-Inertgas-Methode oder Elektronenstrahlschweißen. Hartlote dürfen keine Metalle mit hohem Dampfdruck enthalten. Flußmittelreste müssen sorgfältig entfernt werden.

Entscheidend für die Erzielung eines guten Enddrucks ist die Oberflächenbeschaffenheit der UHV-Bauteile. Glatte Oberflächen sind erwünscht, die nicht nur sauber, sondern auch gut sauber zu halten sind.

Kohlenwasserstoffe sollten aus einer UHV-Apparatur völlig herausgehalten werden. Der Dampfdruck von Kohlenwasserstoffverbindungen führt bereits bei geringer Temperaturerhöhung in der Apparatur zu deutlichem Druckanstieg. Diese schweren Moleküle haften, besser als andere Gasmoleküle, an Oberflächen und sind insbesondere auch bei Untersuchungen von Festkörperoberflächen unerwünscht. Beeinflusst wird der Enddruck in einer UHV-Apparatur, wie schon gesagt, im wesentlichen durch Desorption der Gasmoleküle von den Wänden. Die Abgasrate hängt vom Wandmaterial, seiner Vorbehandlung, der Tempera-

tur und der Zeit ab, während der die Wand dem Vakuum ausgesetzt ist. Die Abgasrate wird mit der Zeit nur unwesentlich kleiner. Beschleunigen kann man den Vorgang durch Ausheizen. Dabei wird die gesamte Apparatur über einen gewissen Zeitraum auf eine Temperatur im Bereich 200 °C bis 350 °C erhitzt, während Turbomolekular-, Kryo- oder Ionenzerstäuberpumpen die desorbierten Gasmoleküle abpumpen.

Für die Auslegung des Gerätes bedeutet dies konkret, daß nur Konstruktionselemente und Bauteile verwendet werden dürfen, bei denen die Funktionsfähigkeit durch eine vorübergehende Erwärmung auf mindestens 250 °C nicht eingeschränkt wird. Werkstoffe müssen ihre Festigkeitseigenschaften behalten.

Darüber hinaus ist bei der Konstruktion von Bewegungselementen zu beachten, daß keine Schmierstoffe verwendet werden können (Forderung: Kohlenwasserstofffreiheit). Das heißt z.B., daß Lager trocken laufen müssen und sich auch bei höherer Temperatur nicht festsetzen dürfen.

Um die Leckraten an Verbindungsstellen in der Apparatur auf Werten $<10^{-12}$ mbar·l·s⁻¹ für Helium zu halten, ist die Verwendung von speziellen UHV-Flanschsystemen erforderlich.

1.3 Eingliederung der Apparatur in bereits vorhandene Geräte und Anordnungen

Der zu entwickelnde Manipulator ist praktisch das letzte Glied in einer Kette von Geräten, die bereits im Betrieb sind.

Vorhanden ist die komplette Molekularstrahl-Apparatur, mit der zur Zeit schon Versuche durchgeführt werden. Als Einstellgerät dient jetzt ein UHV-Manipulator der Firma Varian, der jedoch wie auch ähnliche Geräte der Firmen Huntington oder Vacuum Generators als Serienprodukt nicht so genau auf ein Experiment eingestellt werden kann wie ein Gerät, das speziell dafür entwickelt wurde. Es ist beispielsweise mit dem Varian-Manipulator keine Tiltbewegung möglich.

Zusammen mit diesem Manipulator wurde bisher auch die Hubvorrichtung zur Verschiebung der Probe in Z-Richtung eingesetzt. Dieses Gerät wird über einen UHV-Flansch CF NW 150 auf dem Deckelflansch der Molekularstrahl-Apparatur montiert. Neben einem Hub in Z-Richtung von maximal 252 mm, der über einen Getriebemotor oder von Hand eingestellt werden kann, ist es mit die-

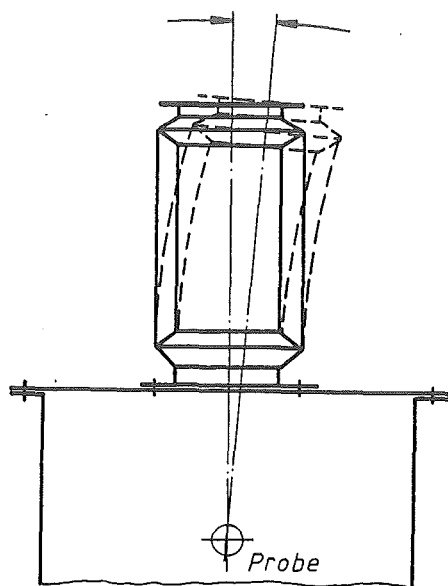


Abb. 4: Kippmöglichkeit der Hubvorrichtung

sem Gerät möglich, eine Kippbewegung von einigen Grad um den Mittelpunkt der Probe durchzuführen. Zusammen mit dem Varian-Manipulator ist so eine, wenn auch geringe, Tiltbewegung möglich. Diese Eigenschaft ist dann jedoch für den neu zu entwickelnden Manipulator praktisch ohne Bedeutung. Die Bewegung des oberen Flansches an diesem Gerät relativ zum unteren, feststehenden Flansch ermöglicht ein Edelstahl-Membranbalg NW 152 mm. Für die Winkelverstellung kann der obere Flansch über eine Rollenführung mit gekrümmten Führungsbahnen bewegt werden, deren Radius 804 mm beträgt. Die Einstellung erfolgt von Hand. Eine Zusammenstellungszeichnung der Hubvorrichtung liegt dieser Arbeit bei.

Da der neu zu entwickelnde Manipulator auf diese Hubvorrichtung aufmontiert werden soll, sind deren Abmessungen zu berücksichtigen. Als Anschluß dient ein UHV-Flansch CF NW 100. Es ist zu beachten, daß alle Teile des Manipulators, die in die Hubvorrichtung und in die Molekularstrahl-Apparatur hineinragen, im Durchmesser kleiner als 100 mm sind bzw. daß drehbare Teile in bezug auf die Mittelachse Abmessungen <50 mm haben. Damit die Probe genau in der Ebene des Molekularstrahls liegt, muß das Führungsrohr, an dem die Probe befestigt wird, von der Unterkante des Montageflansches bis zur Probenmitte genau 836 mm lang sein. Der Aufbau des Manipulators sollte so kurz wie möglich gehalten werden, da die Molekularstrahl-Apparatur zusammen mit der Hubvorrichtung schon eine beachtliche Höhe erreicht

und der Raum bis zur Decke des Labors nicht maximal ausgenutzt werden kann. Für nachträglich an den Manipulator anzubauende Schrittmotoren muß genügend Platz vorgesehen werden.

Im Innern der Apparatur ist für eine Probenhalterung nur ein begrenzter Raum vorhanden.

Der Abstand der Strahl-Austrittsöffnung zur Mittelachse der Hauptrotation und somit auch zur Probe beträgt 66 mm. Der Abstand zur Detektorkammer ist nur 38 mm. Eine Probenhalterung sollte also in ihren Abmessungen horizontal 35 mm nicht überschreiten. Da dies jedoch bei allen Funktionen, die in diesem Teil untergebracht sind, fast unmöglich ist, könnte man, falls erforderlich, durch Zuhilfenahme der X-Y-Verstellung auch eine größere Probenhalterung an der Detektorkammer vorbeifahren.

Die Abmessungen des Probenhalters sollten aber dann doch 45 mm nicht überschreiten.

Da für ein Zusatzexperiment die Probe sehr dicht an das Meßgerät herangefahren werden muß, dessen Durchmesser 140 mm beträgt, darf in einem Umkreis von 70 mm um das Zentrum der Probe herum kein Teil über die Probenoberfläche und somit die Mittelachse des Manipulators hinausragen. Außerdem dürfen im Bewegungsraum der Probe keine Teile angeordnet sein, die eventuell in den Strahl hineinragen.

2 ENTWURF DER APPARATUR

2.1 Lösungsmöglichkeiten zur Realisierung der gewünschten Funktionen

Die Arbeiten, hin zu einem ersten Entwurf und schließlich zu einem Gesamtkonzept zu gelangen, begannen mit einer umfangreichen Literatursammlung. Es stellte sich dabei heraus, daß in Büchern zur Konstruktions- und Vakuumtechnik keine Lösungsmöglichkeiten bezüglich eines Ultrahochvakuum-Manipulators zu finden waren. Es gab nur gelegentlich Ausführungs- und Gestaltungsvorschläge zu bestimmten Komponenten, die vielleicht hier und da in eine Lösung mit eingearbeitet werden könnten.

Erfolgreicher war dann die Durchsicht von Firmenprospekten. Es gibt in Amerika und England einige Hersteller von Vakuumapparaturen, die Einstellgeräte für drei Translationsbewegungen bauen. Der Aufbau ist bei allen Firmen fast gleich: die beiden waagerechten Bewegungen X und Y werden über einen Kreuzschlitten geführt und durch Einstellmikrometer angetrieben. Für die senkrechte Bewegung Z ist eine vertikal angeordnete Führung vorhanden. Der Antrieb erfolgt über eine Gewindespindel. Der Hub in dieser Richtung ist meist auch etwas größer als bei den anderen Richtungen. Oberhalb der Führung für die Y-Bewegung sitzt an einem UHV-Flansch CF NW 35. Daran ist unterhalb ein Stutzen angeschweißt, der durch die X-Y-Führung hindurchragt und dann an einen Edelstahl-Membranbalg NW 35 mm vakuumdicht befestigt ist. Dieser Membranbalg, der unten an einen größeren CF-Flansch angeschweißt ist, macht es möglich, daß alle Einstellelemente und Führungen außerhalb des Vakuumbereichs liegen. An diese Teile werden dann nur Anforderungen in bezug auf die Ausheiz-Temperatur gestellt, während die innenliegenden Teile und Flansche auch der UHV-Technik genügen müssen. Setzt man den oberen CF-Flansch in eine Pseudo-Justierung, so ist die Möglichkeit einer kleinen Tiltbewegung gegeben. Bei dieser Bewegung bleibt jedoch der Mittelpunkt der Probe nicht stationär, wie dies z.B. bei der Tiltbewegung der in der KFA gebauten Hubvorrichtung (siehe 1.3) der Fall ist. Montiert man auf den CF-Flansch eine Präzisions-UHV-Drehdurchführung oder eine kombinierte Dreh-Schiebedurchführung, so wird dadurch zusätzlich eine Drehung um die Hauptachse möglich.

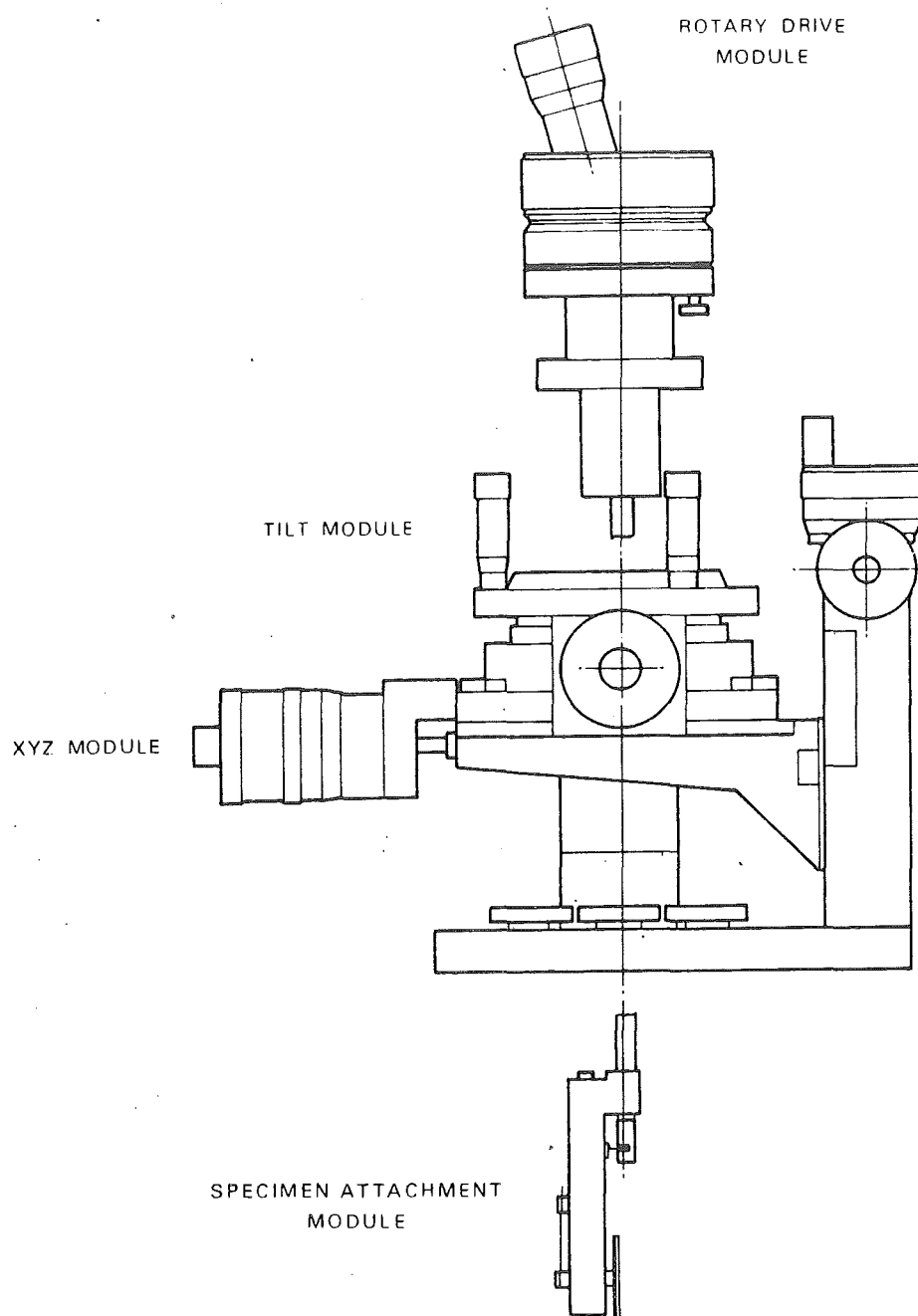


Abb. 5: 3s-2 ϕ -UHV-Manipulator der Firma Vacuum Generators

Der Hersteller bietet dann noch einige Zusatzgeräte an, die, an der Rotationsachse befestigt, eine Umwandlung der Schiebebewegung in eine weitere Rotationsbewegung ermöglichen. Diese Geräte sind jedoch zu allgemein gehalten, um bei dem vorliegenden Experiment Anwendung zu finden, sie können lediglich als Anregung für die Konstruktion spezieller Mechanismen dienen.

Das vorliegende X-Y-Z-Einstellgerät eignet sich in dieser Form auch nicht

zur Kombination mit einem 3 ϕ -Manipulator, da die Durchführung mit einer Nennweite von 35 mm zu eng ist, um ein so umfangreiches Gerät aufzunehmen.

Des weiteren wurde ein Auszug aus der Zeitschrift "Nuclear Instruments and Methods 153 (1978) 99-104" gefunden, in dem über einen ausheizbaren 3 ϕ -UHV-Manipulator berichtet wurde, der an der Universität Salford in England von J.A. van den Berg und D.G. Armour entwickelt worden ist.

Bei diesem Gerät werden die einzelnen Drehbewegungen, von Präzisions-Drehdurchführungen über Schneckengetriebe auf drei ineinandergeschachtelte und einzeln gelagerte Wellen übertragen. Die innere Welle besorgt die Rotation um die Hauptachse. Die beiden darüber angeordneten Hohlwellen sind verschiedenen lang abgesetzt und haben an ihren Enden Gewinde. Darauf laufende Muttern übertragen die Rotation in Translationsbewegungen. Über Zahnstangen, -räder und -segmente erfolgt dann erneut eine Umwandlung in Rotation zum Antrieb von Azimut und Tilt. Damit eine Tiltbewegung in jeder Azimutstellung erfolgen kann, ist der Probenhalter in einem Kardangelenk aufgehängt. Die Drehung um die Hauptachse macht der gesamte Tilt- und Azimutmechanismus mit. Eine spezielle Federung an den Muttern der Gewindespindel sorgt dafür, daß in den Gewindegängen und in den Zahnübertragungen kein Spiel entsteht, das die Einstellgenauigkeit herabsetzen würde.

Die Probenhalterung ist zylinderförmig ausgeführt, und auch hier ist eine Probenheizung vorgesehen.

In der Praxis machte sich bei diesem Gerät die massive Bauweise und damit das große Gewicht negativ bemerkbar. Außerdem soll die Mechanik nicht besonders leichtgängig sein, wodurch die Bedienungsfreundlichkeit herabgesetzt wird. Eine Möglichkeit zur Kühlung der Probe ist nicht gegeben. Bedingt durch die Kardanaufhängung liegt die Probe nicht genügend frei, um bestimmte Experimente durchzuführen. Die Abmessungen des Gerätes im Bereich des Probenhalters sind zu groß für einen Einsatz im Molekularstrahl-Apparat.

Wenn beide hier beschriebenen Geräte für einen Einsatz im Molekularstrahl-Apparat auch nur bedingt geeignet sind, so waren sie doch eine Grundlage für weitere Überlegungen.

Eine Richtung wurde durch die vorhandenen Geräte, Hubvorrichtung und die Platzverhältnisse innerhalb des Molekularstrahl-Apparates bereits vorge-

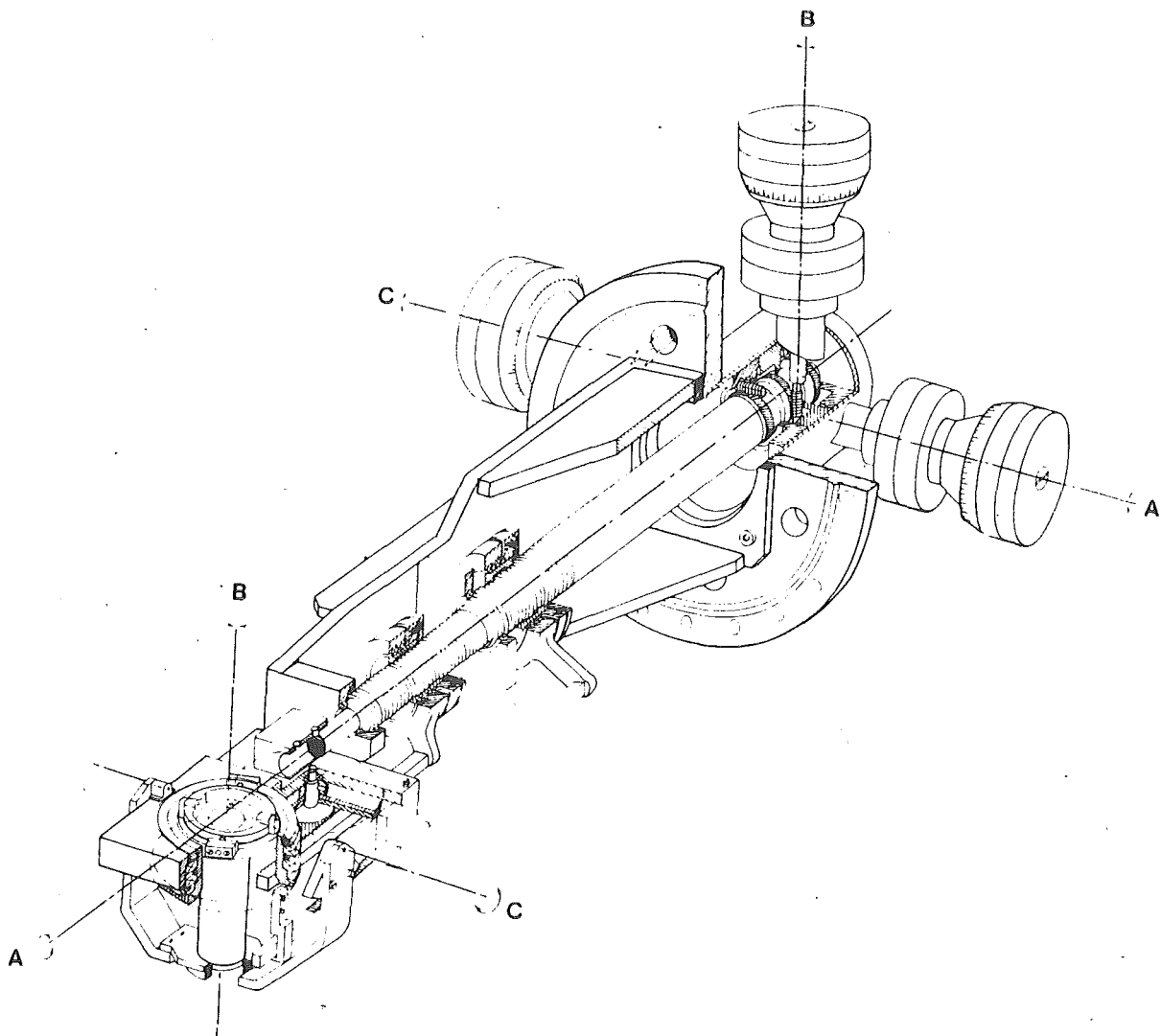


Abb. 6: 3 ϕ -UHV-Manipulator von Van den Berg und Armour

geben: Der Probenhalter muß, integriert in einen 3 ϕ -Mechanismus, an einem Führungsrohr durch die Hubvorrichtung in die Apparatur hineinragen und darf bestimmte maximale Abmessungen nicht überschreiten. Eine gewisse Länge des Führungsrohres zeichnete sich bedingt durch die räumlichen Verhältnisse ebenfalls ab.

Die beiden translatorischen Bewegungen in X- und Y-Richtung würden über eine Kreuzführung und einen Edelstahl-Membranbalg außerhalb des Vakuums realisiert werden können, ähnlich wie bei dem beschriebenen Manipulator der Firma Vacuum Generators. Da bei dieser Lösung keine prinzipiellen Schwierigkeiten zu erwarten waren, konzentrierte ich mich zunächst auf die Realisierung der drei Rotationsbewegungen.

In ersten Skizzen übernahm ich zunächst die Anordnung der ineinanderlaufenden Wellen, angetrieben über Schneckengetriebe, von den Drehdurchführungen, von Van-den-Berg-Manipulator. Die Aufhängung der Probe sowie die Übertragung der Bewegungen für Tilt und Azimut auf den Probenhalter wollte ich jedoch anders gestalten. Grund für die Schwergängigkeit des Van-den-Berg-Manipulators sind wahrscheinlich die Gewindespindeln und die Zahnradübertragungen. Da diese Teile alle ohne Schmierung laufen müssen, dürfte sich eine beachtliche Reibung einstellen. Und dies insbesondere nach dem Ausheizen, bei dem es zu unvermeidlichen Ausdehnungen des Materials kommt.

Bei einem Besuch im IGV, dem späteren Einsatzort des Gerätes, hatte ich gesehen, daß man an dem dort zur Zeit verwendeten Manipulator der Firma Varian die Azimutbewegung über einen Seilzug antreibt. Dies war der Ausgangspunkt für weitere Überlegungen, überhaupt Seilzüge als Antriebselemente zu verwenden.

Das galt zunächst für die Azimut-Bewegung. Wenn man den Probenhalter zylindrisch gestaltet, so könnte er in seinem unteren Teil die Heizung aufnehmen. Die Probe würde dann von hinten beheizt, und der Molekularstrahl würde nicht behindert. Der obere Teil des Probenhalters, der die Probe aufnehmen, wäre drehbar im unteren Teil gelagert. ein umlaufendes Seil sorgte für die Bewegung.

Alternativ zur Kardan-Lagerung mußte nun für die Tiltbewegung eine andere Lösung gesucht werden. Im Prinzip bot sich dafür eine durch zwei parallele Führungsstangen erweiterte Viergelenkkette an. Diese Konstruktion hat den Vorteil, daß die Probe von allen Seite frei zugänglich ist. Dies ist zum Beispiel beim Anbringen einer Kühlvorrichtung von Nutzen. Die Führung des

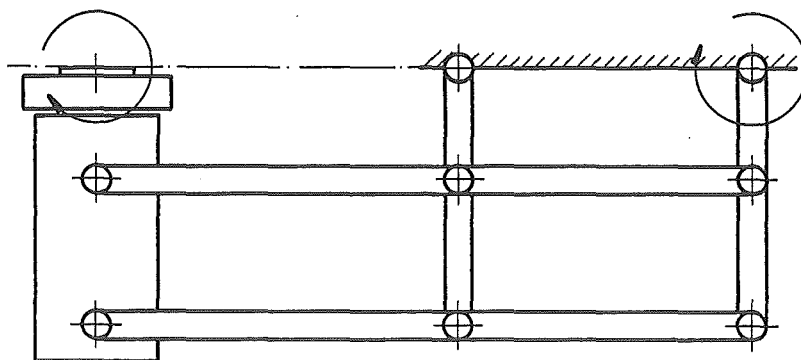


Abb. 7: Erweiterte Viergelenkkette

Azimet-Antriebsseiles wird allerdings komplizierter. Eine mehrfache Umlenkung des Seiles ist erforderlich, wobei sich die Länge des Seilweges nicht oder nur minimal verändern darf.

Eine weitere Schwierigkeit bestand nun darin, das Antriebsseil mit einer immer noch vorgesehenen, drehbaren Welle zu koppeln. Eine erste Idee war, hier ein Kegelradpaar vorzusehen, mit dem die Rotation der Welle um 90° geschwenkt und somit in die Ebene des Seilzuges gelegt würde. Dabei ist jedoch zu beachten, daß sich zusammen mit dem Probenhalter auch der Azimet- und Tiltmechanismus um die Hauptachse mitdrehen, wie dies auch beim Vanden-Berg-Manipulator der Fall ist. Nun wäre zwangsläufig ein Kegelrad mit der Welle für die Azimet-Bewegung verbunden, das andere auf einer Ebene, die der Hauptrotation folgt. Damit wäre die Azimet-Bewegung nicht mehr unabhängig von der Hauptrotation; denn wenn sich die Azimet-Welle relativ zur Hauptrotationsebene bewegt, führt das Kegelradpaar eine Eigenbewegung durch, die eine Verstellung des Azimet zur Folge hat. Dieses System war also unbrauchbar.

Für die Übertragung der Tiltbewegung war zuerst vorgesehen, die Viergelenkkette über eine Schubstange, die im Zentrum der Hohlwellen geführt würde, anzutreiben. Die Umwandlung von Translation in Rotation wäre jedoch unlinear gewesen, außerdem hätte ein ungünstiger Kraftangriff und Reibung in der Führung die Einstellung erschwert.

Es mußte also nach einem ganz anderen Übertragungsmechanismus gesucht werden.

Die Idee, Seile als Antriebsmittel einzusetzen, wurde wieder aufgenommen. Für die Bewegung um die Hauptachse sollte nach wie vor eine feste, durchgehende Welle verwendet werden, an der dann der Probenhalter mit Tilt- und Azimet-Bewegungselementen montiert wäre. Der Seilzug für Azimet-Antrieb sollte bis zum Ende der Hauptwelle durchgezogen werden. Der Tiltantrieb könnte ebenfalls durch Seilzug erfolgen. Dazu müßte eine Seilrolle mit der Antriebslenke der Viergelenkkette gekoppelt sein. Das Tilt-Seil würde dann um 90° versetzt gegenüber dem Azimet-Seil laufen. Es wurde nun zuerst daran gedacht, die Antriebsrollen für die Seile auf einer Platte zu montieren, die die Hauptrotation mitmacht, damit sich die Bewegungsebene der Seile bei einer Rotation der Hauptachse nicht ändert. Damit ergab sich aber wieder das schon besprochene Problem: Die Kopplung mit den Drehdurchführungen hätte über Kegelradpaare erfolgen müssen, die - montiert zwischen einem festen

und einem beweglichen System - wieder Eigenbewegungen gemacht hätten. Bei einer Bewegung um die Hauptachse hätten sich also die Positionen von Tilt und Azimut verändert, was nicht erwünscht ist.

Dieser Tatsache kann man nur begegnen, indem man den Antriebsteil für die Seilzüge fest montiert. Hier zeigt sich jedoch ein Vorteil der Seillösung: Man kann im Prinzip ja die Bewegungsebene des Seiles verändern. Ist die Antriebsrolle des Seiles fest, die Abtriebsrolle drehbar um die Hauptachse angeordnet, so wird das Seil verdreht. Dazu ist zwar eine Längenänderung des Seiles nötig, diese ist jedoch umso kleiner, je kleiner der Abstand der beiden parallel laufenden Seilabschnitte ist bzw. je kleiner der Radius ist, auf dem sich die Enden des parallelen Seilstückes bewegen.

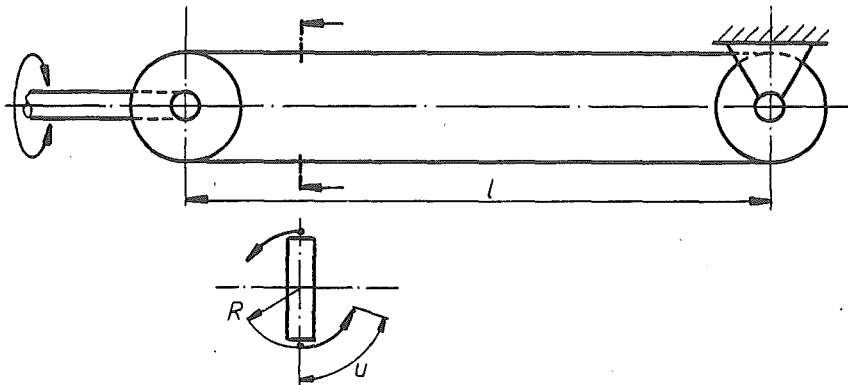
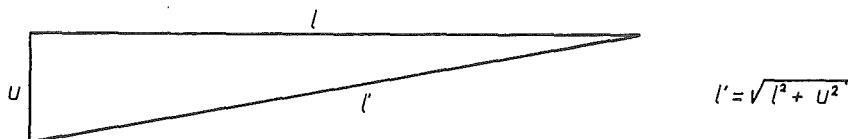


Abb. 8:
Verdrehung
der Seile

Die Längenänderung entsteht nach dem Satz des Pythagoras. Ist l die Länge eines Seilstücks in nicht verdrehter Lage, dann ist l' die Länge des Seilstücks, wenn die Abtriebsrolle um einen bestimmten Winkel verdreht wurde, so daß das Seilende den Weg u auf den Umfang eines gedachten Kreises mit dem Radius R zurückgelegt hat.



Bringt man die parallelen Seilstücke enger zusammen, so wird auch der Radius des Kreises, auf dem sich deren Enden bewegen, kleiner und der Kreisumfang verhält sich proportional zum Radius. Eine Verdrehung der Seilführung um die Hauptachse kann nicht beliebig weit gehen. Bereits nach einer Drehung von 180° legen sich die beiden vorher parallelen Seilabschnitte auf-

einander, bei der Bewegung des Seils tritt Reibung auf; bei weiterer Drehung um die Hauptachse ist dann sehr bald keine Seilbewegung mehr möglich, weil sich die beiden Seilabschnitte umschlingen.

Nun beträgt bei dem zu entwickelnden Manipulator der Drehwinkel um die Hauptachse $\pm 135^\circ$. Sorgt man dafür, daß An- und Abtriebsrollen der Seilführungen bei Mittelstellung der Hauptrotation genau in einer Ebene liegen, so kann es in den Endstellungen nicht zu einer Seilberührung kommen. Dies wurde in einem praktischen Versuch nachgeprüft. Voraussetzung für eine einwandfreie Funktion ist allerdings, daß die Seile in jeder Stellung genügend gespannt sind. Die Verwendung von Seilspannern ist auch noch aus anderen noch zu besprechenden Gründen unerlässlich.

Zum Schluß noch etwas zur Realisierung der Probenkühlung. Es wurde zuerst daran gedacht, in die Befestigungsplatte für die Probe einen Kaltkopf zu integrieren. Man würde dann in eine Platte eine spiralförmig verlaufende Nut einfräsen und diese durch eine plane Platte abdecken, so daß ein Kanal entsteht. Durch diesen Kanal leitet man flüssigen Stickstoff, der dort verdampft. Die Verdampfungswärme entzieht er seiner Umgebung, also dem Material, das ihn umgibt und somit durch Wärmeleitung auch der Probe. Nun muß aber für eine solche Vorrichtung eine Stickstoffzu- und -ableitung geschaffen werden, die in diesem Fall fest mit dem beweglichen Teil des Probenhalters verbunden ist.

Eine Leitung jedoch, die so flexibel ist, daß sie eine Bewegung um drei Achsen bei Stickstofftemperatur (77 K) mitmacht, deren Werkstoff UHV-beständig ist, also auch der Ausheiztemperatur standhält, gibt es in den geforderten Abmessungen (Durchmesser 2 - 4 mm) nicht.

Es wurde deshalb überlegt, einen feststehenden Kaltkopf, der auch nach dem beschriebenen Prinzip funktioniert, in der Nähe der Probe anzuordnen, so daß er die Bewegungen der Probe nicht behindert. Über eine flexible Kupfer- oder Silberlitze, bestehend aus vielen dünnen Einzeldrähten, könnte dann der Wärmetransport ablaufen. Diese Litze könnte den Bewegungen der Probe folgen. Bei diesem Prinzip stellt sich zwar ein gewisser Temperaturverlust ein, aber die Leistung des Kaltkopfes und die Abmessungen der Litze (Länge, Durchmesser) müßten so gewählt werden, daß sich an der Probe eine Temperatur unter 100 K einstellt.

Nachdem nun eine Reihe von Lösungsmöglichkeiten erarbeitet worden war, sollten diese in einem ersten Gesamtentwurf zusammengefaßt werden, damit dann mit der Bearbeitung von Detailproblemen begonnen werden konnte.

2.2 Beschreibung und Begründung der gewählten Lösung

In dem vorangegangenen Kapitel wurde der Weg hin zu brauchbaren Lösungen beschrieben. Es soll nun noch einmal zusammengefaßt werden, warum bestimmten Lösungsmöglichkeiten der Vorzug vor anderen gegeben werden.

2.2.1 Realisierung der Translationsbewegungen in X- und Y-Richtung

Die beiden Translationsbewegungen werden über eine Kreuzschlitten-Führung ermöglicht. Dabei sitzen die Einstell- und Führungselemente außerhalb des Vakuums. Die Übertragung der Bewegungen nach Innen erfolgt über einen Edelstahlmembranbalg, dessen unteres Ende mit dem Anschlußflansch des Gerätes fest verschweißt ist. Das obere Ende geht in einen Rohrstutzen über, der durch die Kreuzführung hindurch ragt und ihren Bewegungen folgt. Die Kreuzführung wird auf ein festes Gestell montiert, das unten ebenfalls mit dem Anschlußflansch verschweißt ist.

Alternativ zu dieser Ausführung wurde keine weitere Lösungsmöglichkeit erarbeitet. Der Kreuzschlitten ist ein bewährtes und in der Praxis häufig angewendetes Prinzip. Über die Gestaltung der Führungselemente (Wälzkörperführung, Schwalbenschwanzführung o.a.) soll an anderer Stelle noch etwas gesagt werden.

Ansatzpunkt für eine Diskussion wäre vielleicht die Verwendung des Membranbalges. Dem Argument, die Führungs- und Einstellelemente liegen außerhalb des Vakuums, wäre entgegenzuhalten, daß ein Membranbalg, besonders wenn er einen relativ großen Durchmesser wie in diesem Fall hat entsprechend große Kräfte auf die Führung ausübt, bedingt durch den äußeren Luftdruck. Die Kräfte liegen durchaus im Bereich von Kilonewton, was bei der Dimensionierung der Führungen zu beachten ist. Des weiteren sind Kräfte von einigen Dekanewton für laterale Bewegungen des Balges aufzubringen. Mit diesen Kräften werden Einstell-Mikrometerschrauben belastet; eine nicht gerade typische Anwendung.

Eine Führung, die innerhalb des Vakuums läge, würde zwar nicht mit großen Kräften belastet, aber es würde dann wieder Einschränkungen bezüglich der Werkstoffauswahl geben. Die Führung dürfte nicht geschmiert werden, und vor allen Dingen müßten zur Übertragung der Bewegungen Dreh- oder Schiebedurchführungen verwendet werden, die bei höheren Präzisionsanforderungen nicht gerade preiswert sind. Die Abmessungen und der Aufwand eines so aufgebauten Gerätes wären mit Sicherheit größer. Außerdem ließe sich eine solche Komponente nicht so gut in das Gesamtkonzept, das ja durch die Z-Hubvorrichtung schon vorgezeichnet ist, integrieren.

2.2.2 Ausführung der drei Rotationsbewegungen

Der Probenhalter hat eine zylinderförmige Gestalt. In seinem unteren Teil sitzt die Probenheizung mit Anschlußklemmen für Hochspannung ($U = 1 \text{ kV}$). Der obere Teil, auf den die Probe befestigt ist, kann gedreht werden und ermöglicht so die Azimut-Bewegung.

Die Tilt-Bewegung bewirkt eine Viergelenkkette, die als Parallelkurbeltrieb, also mit gleichgroßer An- und Abtriebslenke versehen ist. Der ganze Probenhalter ist an der verlängerten Koppel und einer parallelen Führungstange aufgehängt. Dadurch bildet er ein sich parallel zur Abtriebslenke bewegendes Element. Die Oberfläche der Probe liegt mit dem Fundament der Viergelenkkette auf gleicher Ebene, so daß im Zentrum der Probe ein Drehpunkt entsteht.

Das Fundament der Viergelenkkette ist mit einer drehbaren Welle verbunden, die die Hauptrotation der Probe ermöglicht. Durch die Anordnung kann eine Tilt- oder Azimutbewegung in jeder Position der Hauptachse durchgeführt werden. Ein Unterschied in der Ausführung gegenüber dem Van-den-Berg-Manipulator besteht hier im Prinzip nur bei der Tilt-Bewegung. Der Viergelenkkette wurde gegenüber dem Kardangeln der Vorzug gegeben, weil sie leichter zu fertigen ist und wahrscheinlich kleinere Abmessungen hat. Außerdem ist die Probe von allen Seiten frei zugänglich, was für die Anbringung einer Kühleinrichtung von Vorteil ist.

2.2.3 Übertragung der Rotationsbewegungen von den Drehdurchführungen

Von allen drei Drehdurchführungen wird die Bewegung durch Kegelradpaare übernommen. Für die Hauptrotation ist das Abtriebskegelrad fest mit einer drehbar gelagerten Hohlwelle verbunden, die auf der Mittelachse des Manipulators liegt und an deren anderen Ende der Probenhalter über den Tilt-Antrieb montiert ist.

Für die anderen zwei Rotationen ist das Abtriebskegelrad mit einer Seilrolle gekoppelt. Die Bewegung wird also mittels Seilzug übertragen. Die Abtriebsrolle für die Azimut-Rotation ist direkt in den drehbaren Teil des Probenhalters integriert. Die Seilführung erfolgt über mehrere Umlenkenrollen um die Tilt-Viergelenkkette herum. Die Abtriebsrolle für die Tiltbewegung ist über einen Mitnehmer mit der Antriebslenke der Viergelenkkette verbunden.

Die Seile, die für Tilt und Azimut um jeweils 90° versetzt liegen, laufen in Vierpol-Anordnung innerhalb der Hohlwelle. Da die Bewegungsmechanismen dieser beiden Rotationen der Hauptdrehung folgen, werden die Seile gegeneinander verdreht. Eine sichere Führung gewährleisten Rollenkäfige jeweils am Anfang und am Ende der Hohlwelle.

Durch Anwendung eines Antriebs mit Seilen soll versucht werden, das Bewegungsverhalten zu verbessern. Bei starren Übertragungselementen (Zahnstangen, Gewindespindeln) besteht bei extremen Betriebsbedingungen (hohe Temperatur, keine Schmierung) die Gefahr des Festfressens. Für die Übertragung zu den Drehdurchführungen wurde Kegelrädern gegenüber Schneckengetrieben der Vorzug gegeben, weil in der KFA bereits öfters Kegelradgetriebe im Ultrahochvakuum erfolgreich eingesetzt wurden. Mit Schneckengetrieben wurden noch keine Erfahrungen gesammelt. Zur Verbesserung der Laufeigenschaften sind die aufeinanderlaufenden Räder aus verschiedenen Werkstoffen gefertigt.

Bei der Verwendung von Seilen als Antriebselemente liegt der Gedanke nahe, durch Längenänderungen des Seils infolge Belastung oder Temperatureinflüsse könnten sich Ungenauigkeiten in der Übertragung ergeben, insbesondere bei einer Einstellgenauigkeit von $0,1^\circ$. Nun sind innerhalb der Übertragungskette Seilspannvorrichtungen vorgesehen, die eine Längenänderung so kompensieren, daß sich dabei die Winkeleinstellung nicht ändert. Die auf-

tretende Belastung ist so gering, daß eine Dehnung des Seiles aus diesem Grund nicht erwartet wird. Die Längenänderung durch Temperaturschwankungen liegt in einer Größenordnung, in der sie durch die Seilspanner aufgefangen werden kann.

Als großer Vorteil ist es anzusehen, daß innerhalb der Seilführung kein Spiel auftritt, welches bei jeder Zahn- oder Gewindeübertragung berücksichtigt werden müßte.

2.2.4 Realisierung der Kühleinrichtung für die Probe

Die Einrichtung einer direkten Probenkühlung, integriert in den Probenhalter, scheiterte, wie bereits unter 2.1 angedeutet, an einer genügend flexiblen Stickstoffzuleitung und deren Anschluß am beweglichen Probenkopf. Es wurde deshalb ein externer Kaltkopf vorgesehen, der über eine flexible Kupferlitze die Wärme von der Probe abzieht.

Der Kaltkopf selbst hat innen einen möglichst langen, in Schleifen oder Spiralen angeordneten Kanal, in dem der flüssige Stickstoff Wärme von der Wand aufnimmt und verdampft.

Es wurden keine weiteren Lösungsmöglichkeiten erarbeitet, da dieses Prinzip allgemein in der Kryotechnik angewendet wird. Man könnte den Kaltkopf allerdings auch noch in Form eines Badkryostaten gestalten. Dies wäre ein topfähnliches Gebilde, in dem ständig eine gewisse Menge flüssigen Stickstoffs ansteht und verdampft. Während bei diesem Prinzip die Kälteleistung weitgehend einen konstanten Wert hat, kann sie bei den anderen Verfahren durch Änderung des Durchflusses in gewissen Grenzen variiert werden.

2.3 Prinzipieller Aufbau des Manipulators unter Berücksichtigung der gegebenen Abmessungen und Platzverhältnisse sowie der besonderen Betriebsbedingung

Aufbauend auf die bisher besprochenen Punkte entstand nun ein Entwurf der Apparatur, der dann noch durch Ausführung der Details vervollständigt werden mußte.

Als Anschauung soll eine Zeichnung in di-metrischer Parallelperspektive dienen, die den prinzipiellen Aufbau zeigt. Der Einbau erfolgt, wie dar-

gestellt, senkrecht. Zur Montage auf die Z-Hubvorrichtung dient ein Flansch NW 100 mm. Da es sich um eine UHV-Apparatur handelt, wurden für alle lös-
baren Verbindungen Conflat-Flansche vorgesehen. Bei diesem System werden
spezielle Kupferdichtungen zwischen Dichtlippen der Flansche gequetscht.
Auf den Flansch ist ein Stutzen geschweißt, der mehrere Anschlußrohre mit
CF-Flansch NW 16 mm enthält. Diese Anschlüsse sollen Durchführungen für
Betriebsstoffe (Stickstoff, Heizstrom) und Meßleitungen aufnehmen. Oberhalb
des Stutzens sitzt ein Edelstahl-Membranbalg NW 82 mm, der eine Verschiebung
des darauf montierten Geräteteils in X- und Y-Richtung zuläßt. Die Führung
dieser Bewegungen übernimmt ein Kreuzschlitten, der mit Kreuzrollenführungen
ausgestattet ist. Als Antrieb dienen zwei Einstellmikrometer.

Der obere, am Membranbalg befestigte und durch die Kreuzführung hindurch-
ragende Rohrstutzen ist an den Getriebekopf angeflanscht. In diesem Getrie-
bekopf werden die Bewegungen der Drehdurchführungen für die drei Rotatio-
nen über Kegelräder auf eine drehbare Welle und zwei Seilzüge übertragen.
Die Seile verlaufen innerhalb der drehbaren Hohlwelle, die selbst in einem
Führungsrohr gelagert ist, das vom Getriebekopf aus hinab in die Moleku-
larstrahl-Apparatur ragt.

Am unteren Ende der Hohlwelle ist die Tilt-Viergelenkkette angebracht, die
den Probenhalter trägt. Außerdem befinden sich dort die erforderlichen
Umlenkrollen für die Führung der Seile. Im Probenhalter ist die Heizung
und die Azimut-Drehvorrichtung untergebracht. Der Kaltkopf befindet sich
zwischen Montageplatte der Viergelenkkette und Probenhalter. Die Stickstoff-
leitungen dienen hier gleichzeitig als Halterung.
Der Verlauf der Betriebsleitungen ist aus dem Prinzipbild nicht zu ersehen.
Darüber muß in den Ausführungen zur Detailkonstruktion noch etwas gesagt
werden.

Bei der Konstruktion des Gerätes mußten die unter 1.3 geforderten Maße,
die sich aus Abmessungen der Z-Hubvorrichtung sowie aus Gerätenaordnungen
innerhalb des Molekularstrahlapparates ergeben, berücksichtigt werden. Da
sich durch diese Maße und die Anordnung aller Komponenten übereinander eine
beachtliche Gesamtlänge einstellt, mußte darauf geachtet werden, daß die
vertikalen Abmessungen der oberen Baugruppen so knapp wie möglich gehalten
wurden.

Ausschlaggebend für die Werkstoffauswahl war die Betriebsbedingung UHV.

Das Gerät besteht weitgehend aus Edelstahl, X10 CrNiTi 18 9, 1.4541, der sich als UHV-Werkstoff in der KFA bewährt hat. Bei allen Fertigteilen wie Kugellager, Federn, Rohrmaterial, Drahtseil usw. mußte darauf geachtet werden, daß diese Teile ebenfalls aus UHV-tauglichem Werkstoff gefertigt sind und ihre Funktionsfähigkeit auch bei der Ausheiztemperatur von 250 °C bzw. nach dem Ausheizen noch gewährleistet ist.

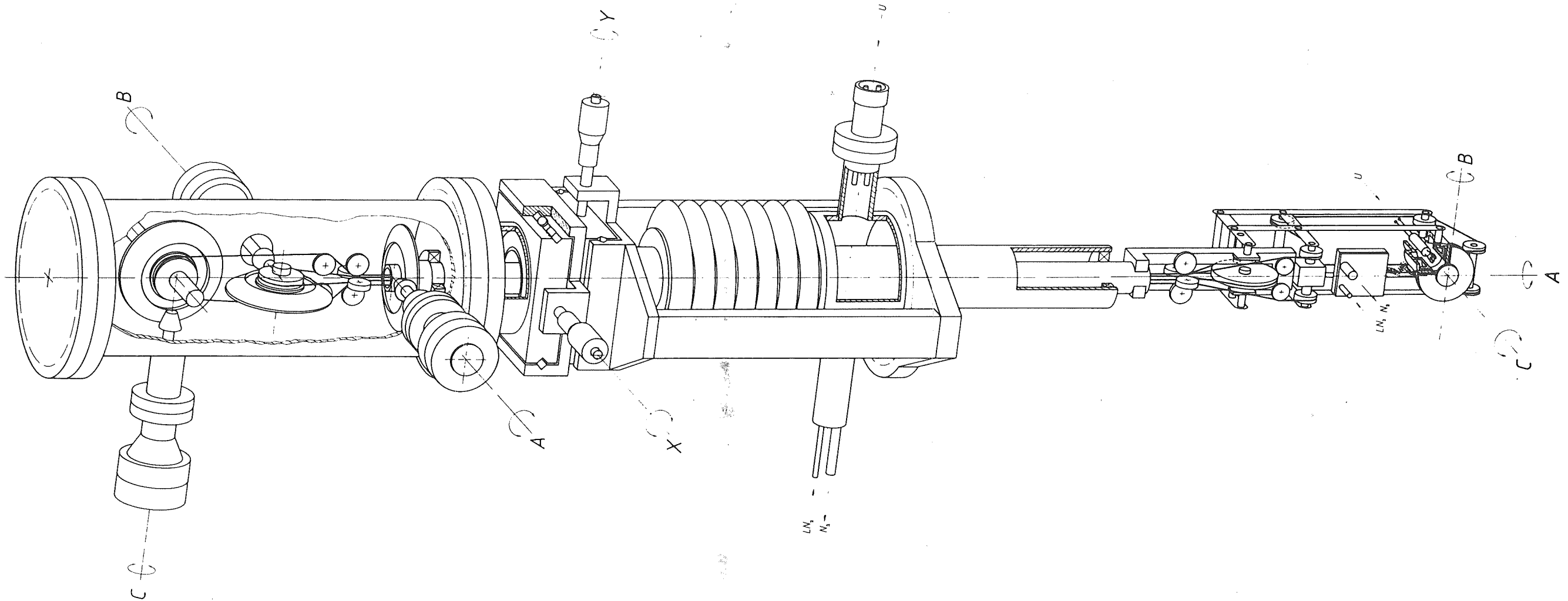
Alle Schweißnähte mußten so gelegt werden, daß keine Gaseinschlüsse entstehen konnte, also bei Teilen, die von einer Seite dem Vakuum, von der anderen Seite dem Atmosphärendruck ausgesetzt sind, immer vakuumseitig. Weiterhin mußten überall dort, wo bei der Montage Gastaschen gebildet werden konnten, wie z.B. bei Sacklöchern für Schraubengewinde, Entlüftungsbohrungen vorgesehen werden.


Außerdem war darauf zu achten, daß alle Löcher und Durchgänge sowie Rohre, die innerhalb des Vakuums liegen, einen möglichst großen Querschnitt haben und alle Innenräume so wenig wie möglich verwinkelt sind. Je größer in der Vakuumtechnik und besonders in der UHV-Technik beispielsweise ein Rohrquerschnitt ist, umso günstiger ist der Leitwert des Teils. Man kann sich den Leitwert und den Gasstrom in der Vakuumtechnik analog zum elektrischen Leitwert und elektrischen Strom vorstellen. Die Abmessung und Gestaltung von Innenräumen hat einen entscheidenden Einfluß auf die Auspumpzeit der Anlage.

Hier standen natürlich die Forderungen im Widerspruch zu mechanischen Ansprüchen, und es mußte so gut wie möglich ein Kompromiß gefunden werden. Die Evakuierung der Apparatur soll zunächst über die Pumpen des Molekularstrahl-Apparates mit erfolgen. Sollte dies nicht ausreichen, so könnte am oberen Deckelflansch am Getriebekopf des Manipulators eine weitere Pumpe montiert werden.

Diese Pause unterliegt - nicht - dem Änderungsdienst

Für diese Zeichnung beanspruchen wir alle Urheberrechte auch für den Fall der Späterverwendung oder Nachdruck, Nachverbreitung, Vervielfältigung oder Weitergabe an Dritte nur nach unserer schriftlichen Zustimmung.



Scharfe Kanten 0,4 gebrochen							Auftrags-Nr.				104917			Benennung			Maßstab				
Oberflächen Reihe 2 DIN 3141											1983		1.02		Name		UHV-Manipulator				
Oberflächen- zeichen		~ ▽ ▽ ▽ ▽ ▽ ▽ ▽									gez		18.02.83								
Zul. gr. Rau- heits R _a (µm)		beliebig 100 25 6,3 1									geprüft		21.1.81		Kopiert						
											Norm										
Freimaßtoleranz: mittel DIN 7168															Kost -St 883		Zeichnungs-Nr.				
Nennmaß- bereich		über über über über über über															246.01.01.83 - P				
		6 30 120 315 1000 2000																			
		bis bis bis bis bis bis																			
		6 30 120 315 1000 2000 4000															Ersatz für				
																			Ersetzt durch		
Abweichung		±0,1 ±0,2 ±0,3 ±0,5 ±0,8 ±1,2 ±2					Ander Buchst.		kommt x vor		Tag		Name								

Positionen der Zeichnung Nr. 246.01.01.83

Pos.	Benennung	Bemerkung	siehe Text	Werkstoff
1	Probe		1.1.2	Pt-Einkristall
2	Probenbefestigung		3.2.1	Molybdän
3	Seilrolle	Azimut-Rotation	3.2.1	1.3952
4	Gehäuse des Probenhalters		3.2.1	1.3952
5	Kupferlitze 20 mm ²	zur Wärmeübertragung	3.2.1	Kupfer
6	Kaltkopf		3.2.1.5	E-Kupfer
7	dünnwandiges Stahlrohr	Stickstoffleitung	3.2.6	1.4541
8	Gelenkgetriebe	Tilt-Rotation	3.2.2	1.4541
9	Seilspanner	Azimut-Seilzug	3.2.2	1.4541
10	Seilrolle	Tilt-Rotation	3.2.2	1.4541
11	Rollenkäfig	Seilführung	3.2.2	1.4541
12	Befestigung des Getriebeteils		3.2.2	1.4541
13	Rohrleitungshalter		3.2.6	Glaskeramik
14	Biegefeder aus Stahlrohr	Stickstoffzuleitung	3.2.6	1.4541
15	UHV-Lager	Lager der Hauptrotation	3.2.3	1.4541/CuBe
16	Hohlwelle	Hauptrotation	3.2.3	1.4541
17	Biegefeder aus Stahlrohr	Stickstoffableitung	3.2.6	1.4541
18	Kupplungsstück	Verschraubung	3.2.6	1.4541
19	Rohrleitungshalter		3.2.6	Glaskeramik
20	Deckelflansch	Molekularstrahlapp.	1.3	1.4541
21	Heizungszuleitung	Kupferlitze, isol.	3.2.6	Kupfer
22	Führungsrohr		3.2.3	1.4541
23	Hubvorrichtung	extern	1.3	
24	Abstützung	Balgkräfte	3.2.5	1.4541
25	Rohrstutzen	UHV-Stromdurchführung	3.2.6	1.4541
26	Schraubbolzen	Befestigung		
27	Flansch CF NW 100	Sonderanfertigung	3.2.5	1.4541
28	dünnwandiges Stahlrohr	UHV-Durchführung	3.2.6	1.4541
29	Stahlrohr	Stickstoffleitung	3.2.6	1.4541
30	Edelstahl-Membranbalg	X-Y-Bewegung	3.2.5	1.4541
31	Durchführungsstutzen		3.2.5	1.4541
32	Montageschrauben	UNF-Gewinde	3.2.4	

Pos.	Benennung	Bemerkung	siehe Text	Werkstoff
33	X-Y-Kreuzschlitten		3.2.5	1.4541
34	UHV-Lager	Hauptrotation	3.2.4	1.4541/CuBe
35	Einstell-Mikrometer	ausheizbar	3.2.4	
36	Spiralfeder	Hauptrotation	3.2.4	1.4568
37	Abtriebskegelrad	Hauptrotation	3.2.4	1.4541
38	Antriebskegelrad		3.2.4	CuBe
39	Montagekäfig		3.2.4	1.4541
40	Präzisions-Drehdurchführung	ausheizbar	3.2.4	
41	Seilspanner	Tilt-Drahtseil	3.2.4	1.4541
42	Rollenkäfig	Seilführung	3.2.4	1.4541
43	Kegelrad/Seilrolle	Tilt-Bewegung	3.2.4	1.4541
44	Klemmschraube	Seilbefestigung	3.2.4	1.4541
45	Befestigungsbolzen	für Spiralfeder	3.2.4	1.4541
46	Getriebekastengehäuse	Stahlrohrkonstruk- tion	3.2.4	1.4541
47	Kegelrad/Seilrolle	Azimet-Bewegung	3.2.4	1.4541
48	Spiralfeder	Azimet-Bewegung	3.2.4	1.4568

3 KONSTRUKTION

3.1 Unterteilung des Manipulators in Funktionsgruppen

Nachdem das Gerät unter 2.3 bereits im Überblick vorgestellt wurde, soll nun eine Beschreibung im einzelnen erfolgen. Als Ergänzung liegen der Arbeit auch einige Konstruktionszeichnungen bei, auf die dann an entsprechender Stelle speziell hingewiesen wird.

Zur besseren Gliederung der Beschreibung erfolgt eine Aufteilung des Gerätes in einzelne Gruppen. Mit dieser Unterteilung wurde auch die Konstruktion selbst durchgeführt.

1. Probenhalter mit Heizung und externem Kaltkopf
2. Tilt-Mechanismus und Seilrollenführung
3. Führungsrohr mit Übertragungselementen für Rotationen
4. Getriebekasten für Rotationen
5. Kreuzführung für Translationen mit Membranbalg
6. Zu- und Ableitungen für Betriebsmittel mit Durchführungen

3.2 Beschreibung der einzelnen Funktionsgruppen

3.2.1 Probenhalter mit Heizung und externem Kaltkopf

3.2.1.1 Anforderungen

Die Probe muß mittels einer geeigneten Vorrichtung befestigt werden, wobei die Probenoberfläche genau auf der Mittelachse des Manipulators liegt. Die Montage und Justierung der Probe soll dabei so leicht wie möglich erfolgen können. Bei der Auslegung der Proben-Befestigung ist zu berücksichtigen, daß dieses Teil wie die Probe selbst enormen Temperaturunterschieden ausgesetzt ist. Die Heizung der Probe erfolgt über Wärmestrahlung und Elektronenbeschuß. Eine gewisse Belastung der Umgebung ist dabei nicht zu vermeiden. Außerdem wird Wärme von der Probe abgeleitet. Da die Temperatur an der Probe bis 1200 °C betragen soll, muß an der Befestigung auch mit ca. 1000 °C gerechnet werden.

Die Kühlung der Probe erfolgt über Wärmeleitung, also direkt über die Be-

festigung. Die Temperatur kann bei diesem Betrieb $<100\text{ K}$ sein.

Zur Erzielung der extremen Temperaturen dürfen die zu erwärmenden bzw. zu kühlenden Teile nur so groß wie eben nötig sein, damit keine große Heiz- bzw. Kälteleistung benötigt wird. Aus diesem Grund muß die Probenbefestigung isoliert von anderen Teilen montiert werden.

Die Probe ist ein scheibenförmiges Metallstück. Die Befestigung sollte am Rand erfolgen, da sowohl die Oberfläche als auch die Rückseite (wegen der Heizung) freiliegen müssen. Andererseits muß für die Wärmeableitung im Kühlbetrieb eine genügend große Kontaktfläche vorhanden sein. Da es sich bei der Probe um einen gezogenen Einkristall handelt, können die Abmessungen variieren. Dies ist bei der Gestaltung der Haltevorrichtung zu berücksichtigen.

Die Probenkühlung geschieht über einen externen Kaltkopf. Dabei wird die Wärme über eine flexible Kupferlitze und über die Halterung abgeleitet. Die Verbindung der Kupferlitze sollte lösbar sein. Um die Verluste klein zu halten, ist ein möglichst kurzer Leitungsweg anzustreben. Der Kaltkopf muß so bemessen sein, daß unter Berücksichtigung aller Verluste die gewünschte Temperatur an der Probe erzielt werden kann.

Die Heizung wird vom Institut beigestellt. Es muß dafür nur der Platz mit richtigen Abmessungen sowie eine Klemmvorrichtung für die Zuleitungen geschaffen werden.

Für die Azimut-Bewegung ist die Probenhalterung drehbar anzuordnen. Für diese Funktion muß auch eine Seilrolle vorhanden sein.

Da es in der Umgebung der Heizung (nicht nur an der Probe) zu erheblicher Erwärmung kommt, sollte auch zwischen Innen- und Außenteil eine Isolierung vorgesehen werden.

Ferner muß bei der Konstruktion des Probenhalters an die Seilführung für die Azimut-Bewegung und an die Aufhängung in der Viergelenkkette gedacht werden, wobei das ganze Teil die Abmessungen $40 \times 40\text{ mm}$ nicht überschreiten sollte.

Der ganze Probenhalter muß aus unmagnetischem Werkstoff gefertigt werden.

3.2.1.2 Beschreibung des Lösungsweges

Grundlage für die Überlegungen zur Gestaltung des Probenhalters waren eine Zeichnung und Skizzen von dem Probenhalter, der zur Zeit an dem Varian-Manipulator im IGV montiert ist und auch dort gebaut wurde. Ferner wurde

auch in der Beschreibung des Manipulators von Van den Berg und Armour etwas über den dort eingebauten Probenhalter gesagt.

Meine ersten Skizzen und Entwürfe zeigen dann auch einen Aufbau, der im Prinzip beibehalten wurde:

Ein äußerer, ringförmiger Teil trägt außen Bolzen zur Aufnahme der Seilrollen und Haltestangen. Innen ist eine Kugellagerung vorgesehen, in der, drehbar angeordnet, ein Körper steckt, der die Heizung aufnimmt. Diese Heizung ist ein Tantal-Wendel, der in einem Keramikröhrchen gehalten wird und von einem Wehnelt-Zylinder aus Tantal umgeben ist.

Der drehbare Teil des Probenhalters ragt oben über den feststehenden hinaus und ist dort als Seilrolle gestaltet. Darauf kann nun über eine Keramikplatte als Isolierung die Haltevorrichtung für die Probe montiert werden. Diese Haltevorrichtung besteht aus zwei aufeinandergeschraubten Platten, die jeweils in der Mitte mit einer Bohrung versehen sind, damit Vor- und Rückseite der Probe offenliegen. Die Platten sind so gestaltet, daß die Probe dazwischen eingeklemmt wird. Die Kupferlitze wird am Ende in einen Kabelschuh gefaßt und dann auf die Befestigungsplatten aufgeschraubt.

Das größte Problem bei der Auslegung des Probenhalters waren die geforderten Abmessungen.

Zuerst war vorgesehen, den inneren Teil in zwei Kugelkränzen zu lagern, um eine stabilere Ausführung zu erhalten, weil ja durch das antreibende Seil eine radial wirkende Kraft zu erwarten ist.

Um eine möglichst schwingungsfreie Aufhängung des Probenhalters zu gewährleisten, sollten die beiden Führungsstangen soweit wie möglich auseinanderstehen.

Nun mußte der äußere, feststehende Teil des Probenhalters aus Platzgründen eine geringe Wandstärke haben. Dadurch konnte aber nicht an gleicher Stelle ein Bolzen und ein Lagerkranz sitzen. Außerdem war inzwischen überlegt worden, die Lagerkugeln nicht aus Stahl, sondern aus einem Werkstoff zu wählen, der neben mechanischer Festigkeit auch thermisch isoliert, z.B. Rubin. Nun ist das Vakuum der beste Isolator überhaupt, und jeder zusätzliche Berührungspunkt verschlechtert die Isolation. Deshalb verzichtete ich schließlich auf den zweiten Lagerkranz. Aus Gründen der besseren Isolation wurde auch die Prismenführung bei der Lagerung verwendet und nicht, wie zuerst vorgesehen, eine Form der Führung, die sich an den Radius der Kugeln "anschmiegt", wodurch vielleicht bessere Laufeigenschaften, aber eine schlechtere Isolation erzielt worden wäre. Bei der Prismenführung ist die Auflagefläche der Kugeln kleiner, es gibt nur zwei Berührungspunkte.

In einem weiteren Schritt wurde überlegt, die Heizung nicht drehbar, sondern am äußeren Ring fest zu montieren, sie müßte dann in den drehbaren Teil hineinragen. Diese Maßnahme vereinfachte die Anordnung der Anschlußklemmen. Gleichzeitig wurde der bis dahin rohrförmige, äußere Teil des Probenhalters unten ausgespart, so daß nur noch Stege zur Aufnahme der Aufhängungsbolzen stehenblieben. Auf diese Weise sind die Anschlußklemmen für die Heizung besser zugänglich.

Das Prinzip der Probenbefestigung wurde nicht mehr verändert. Lediglich die Gestaltung der Befestigungsplatten und die Anordnung der Schrauben wurde mehrmals variiert. Im Zuge der Berechnungen zur Auslegung des Kaltkopfes wurden auch die Verluste an der Isolation der Probenbefestigung zum unteren Teil des Probenhalters erfaßt. Dabei mußte die Gestaltung dieser Isolation dreimal geändert werden. Es zeigte sich, daß die Auflagefläche einer Keramikplatte zu groß ist. Diese wurde ersetzt durch Keramikhülsen, die die Probenbefestigung im Bereich der Montageschrauben abstützten. Die Auflagefläche wurde dadurch erheblich verkleinert. Eine weitere Verbesserung wurde erzielt durch die Verwendung von Keramikugeln, die eine ganz geringe Auflagefläche haben und somit die Verluste durch Wärmeleitung noch verkleinern.

Bei der Kupferlitze, die den Wärmetransport zum Kaltkopf übernehmen soll, wurde schon bald von der Verwendung eines Kabelschuhs abgesehen, weil sich dabei mehrere thermische Übergangswiderstände ergeben hätten. Die Litze sollte vielmehr direkt an der Befestigungsplatte geklemmt werden.

Bei der Gestaltung des Kaltkopfes waren auch wieder die begrenzten Abmessungen mit entscheidend. Zwei Lösungsmöglichkeiten wurden erarbeitet. Der kryotechnische Teil wird in einem speziellen Abschnitt behandelt.

Zunächst wurde angestrebt, den Kaltkopf völlig fest anzuordnen. Dies war jedoch ohne eine Behinderung der beweglichen Teile fast nicht möglich. Der Kaltkopf darf ja nicht weiter als 50 mm von der Mittelachse wegragen, sonst paßt er nicht mehr durch den Anschlußflansch der Hubvorrichtung NW 100. Er konnte also nur in einem Bereich angeordnet werden, der durch die Hauptrotation nicht bestrichen wird. Der Winkel dieser Bewegung beträgt ja 270° , so daß ein "toter Winkel" von 90° im Prinzip vorhanden wäre. Da jedoch die Anordnung eine gewisse Breite, etwa 40 mm hat, bleibt von dem freien Raum nur ein winziges Stück übrig. Dieser Raum ist für den Kaltkopf zu klein. Es kam noch hinzu, daß der Kaltkopf bei dieser Anordnung mindestens 70 mm

von der Probe entfernt montiert werden mußte, da ein Bereich von 70 mm Radius um die Probe herum freigehalten werden soll aus Gründen, die das Experiment betreffen.

Für die feste Anordnung hätte ein zylinderförmiger Kaltkopf verwendet werden sollen. Es wurde jetzt überlegt, eine flache, rechteckige Anordnung innerhalb des Gestänges zwischen Viergelenkkette und Probenhalter zu legen. Dieser Kaltkopf müßte dann die Bewegung um die Hauptachse mitmachen. Die Ausführung ist zwar kryotechnisch gesehen schlechter als die zylindrische, aber der Wärmeleitungsweg über die Kupferlitze wird kürzer, und es besteht nicht mehr die Gefahr, andere Teile zu berühren, was zu einer unkontrollierten Kälteableitung geführt hätte.

Die Ausführung einer beweglichen Stickstoffzu- und -ableitung barg jetzt wieder neue Schwierigkeiten in sich, die in dem Kapitel "Zu- und Ableitungen für Betriebsmittel mit Durchführungen" behandelt werden sollen.

3.2.1.3 Ausgeführte Lösung

Die nachfolgende Beschreibung bezieht sich auf die beiliegende Zeichnung Nr. 246.01.01.83-01 "Probenhalter".

Die Probe hat einen Durchmesser von 10 bis 11 mm und ist am Rand abgestuft, damit sie von einer entsprechend gestalteten Klemmplatte gehalten werden kann. Auf diese Weise steht die zu untersuchende Probenoberfläche minimal über die Klemmplatte hinaus. Die Probe liegt auf einer Grundplatte, die in der Mitte eine Bohrung für die Heizung hat. Die Klemmplatte wird eventuell für jede Probe neu angefertigt, damit ein einwandfreier Sitz möglich ist. Mit drei Stiften wird die Klemmplatte zentriert und mit drei Senkkopf-Schrauben M1 auf der Grundplatte befestigt. Drei weitere Bohrungen auf der Klemmplatte schaffen den Platz für isoliert sitzende Schrauben, die die Grundplatte auf dem drehbaren Teil des Probenhalters befestigen. Zur Isolation sitzen drei Keramikugeln dazwischen. Auf der Grundplatte ist außen ein Kupferring aufgeschraubt, der an einer Seite eine Klemmvorrichtung zur Aufnahme der Kupferlitze hat. Mit Hilfe des Ringes soll eine gleichmäßigere Ableitung der Wärme über die Grund- und Klemmplatte erfolgen.

Der drehbare Teil des Probenhalters ragt oben über den feststehenden hinaus und ist dort als Seilrolle gestaltet. Darunter sitzt die Prismenführung für

die Kugellagerung. Zum Einfüllen der Kugeln bei der Montage ist der untere Schenkel der Führung beweglich angeordnet. Die beiden ringförmigen Teile werden über eine Passung zusammengeschoben und unten durch eine Mutter befestigt.

Der feststehende Teil des Probenhalters ist ebenfalls rund. An beiden Seiten trägt er je zwei Bolzen, auf denen über Kugellager die Führungsstangen der Viergelenkkette und die Seilrollen montiert werden. Auch auf der Rückseite befindet sich eine Achse mit zwei Seilrollen, über die in einem anderen Kapitel gesprochen wird. Die Bolzen am Probenhalter sind durch Querstifte befestigt.

Der Außenkörper des Probenhalters ist unten bis fast zur Mitte ausgefräst, so daß nur zwei Stege stehenbleiben, an denen neben den Bolzen auch eine Keramikplatte befestigt ist, auf der zwei Kabelschuhe, DIN 46234, Nenngröße für M3-Schrauben, montiert sind. Diese Kabelschuhe sind abgewinkelt und dienen als Anschluß für die Zuleitungen der Heizung. Die Anschlußenden der Heizung selbst sind unter den Schrauben geklemmt.

Die Heizung ist mit Madenschrauben in einer Querstrebe befestigt. Der Wehnelt-Zylinder wird an den Keramikröhrchen montiert.

Der Kaltkopf ist in der Zeichnung Nr. 246.01.01.83-02 dargestellt. Er besteht aus zwei rechteckigen, zusammengelöteten Platten. In die untere ist ein Kanal eingefräßt, die obere dient als Abdeckung, und an ihr sind die Zu- und Ableitungen angelötet, kleine Bohrungen sollen die Kupferlitze aufnehmen. Die Stickstoffleitungen dienen gleichzeitig als Befestigung des Kaltkopfes.

3.2.1.4 Konstruktionstechnische Aspekte

Die Bolzen zur Aufnahme der Seilrollen und Befestigung der Führungsstangen wurden nicht, wie es vielleicht naheliegt, mittels Gewinde befestigt, sondern in einer Passung und werden durch einen Querstift gehalten. Der Grund für diese relativ aufwendige Methode ist, daß man ein Gewinde nie so genau zentrieren kann wie eine Bohrung. Da es sich hier um Präzisionsführungen handeln soll, darf eine leichte Dezentrierung nicht hingenommen werden.

Dies gilt in geringerem Maße auch für die Azimut-Lagerung. Hier wurde der lösbare Schenkel der Prismenführung nicht direkt über ein Gewinde befestigt,

sondern es wurde eine Passung vorgesehen, und die Befestigung erfolgt weiter unten durch eine Mutter.

An dieser Stelle ist außerdem zu beachten, daß es infolge der Heizung wahrscheinlich zu starker Erwärmung kommt. Ein Gewinde würde sich vielleicht auf die Dauer nicht mehr lösen lassen. Ob sich die jetzt ausgeführte Anordnung bewährt, muß die Praxis zeigen.

Alternativ zu dieser Lösung könnte man versuchen, den lösbaren Teil der Führung in den Außenring des Probenhalters zu verlegen, wo die Erwärmung geringer ist. Das hätte dann jedoch umfangreiche konstruktive Änderungen zur Folge. Die Seilführung müßte an einer anderen Stelle erfolgen, die Tilt-Bewegung müßte eingeschränkt werden usw.

3.2.1.5 Vakuum- und Kryotechnische Gesichtspunkte

An dieser Stelle sollen einige Anmerkungen zur Auslegung und Gestaltung des Kaltkopfes gemacht werden.

Dieser Kaltkopf ist im Prinzip ein Wärmetauscher. Flüssiger Stickstoff, Temperatur 77 K, fließt innen durch einen Kanal. Dabei nimmt er Wärme von der Wand auf. Diese Wärme benötigt er zur Verdampfung. In gasförmigem Zustand verläßt der Stickstoff dann den Kaltkopf. Dieser hat sich inzwischen abgekühlt. Durch Wärmeleitung erfolgt ein Temperatúrausgleich zwischen allen, mit dem Kaltkopf leitend in Verbindung stehenden Teilen. Dieser Vorgang geht umso schneller vor sich, je größer die Wärmeleitfähigkeit des Teils ist. Das gilt auch für die Kupferlitze und alle nachgeschalteten Teile, so daß schließlich Wärme von der Probe abgezogen wird.

Um bei der Auslegung des Kaltkopfes umfangreiche Wärmetauscher-Berechnungen zu sparen, kann man eine Faustformel anwenden:

$$\frac{A_k}{A} = 0,75 \text{ bis } 1$$

Dabei ist A_k die Mantelfläche des Kühlkanals und A die äußere Fläche des Kaltkopfes. Um dieses Verhältnis zu erzielen, muß der Innenraum zur Verlegung des Kanals so gut wie möglich ausgenutzt werden.

Es wurde zunächst eine zylindrische Anordnung entworfen. Abb. 9 zeigt diesen Kaltkopf im Längsschnitt.

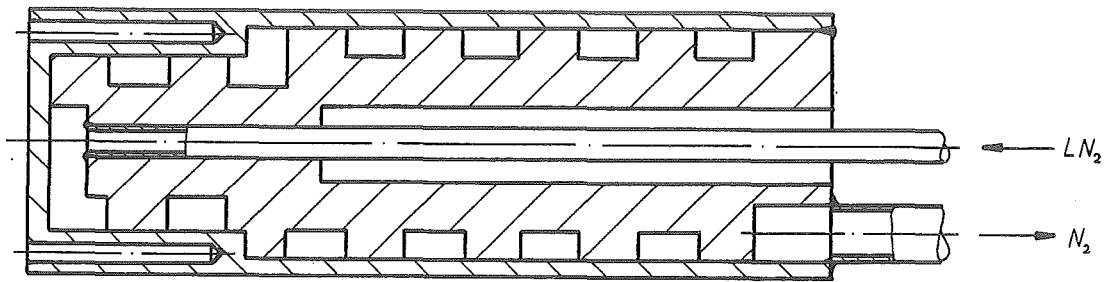


Abb. 9: Aufbau eines zylindrischen Kaltkopfes

In den Innenteil ist ein schraubenförmiger Kanal eingefräßt, den der Stickstoff von vorne nach hinten durchströmt. Die äußere Hülse dient als Abdeckung. In die vorne angeordneten Bohrungen wird die Kupferlitze gesteckt.

Bei den Abmessungen wurde für den Kaltkopf eine etwa doppelt so große Oberfläche vorgesehen, wie das zu kühlende Teil, die Probe mit Befestigungseinrichtung, hat. Deren Oberfläche beträgt etwa 1700 mm^2 .

Mit einer Länge von 55 mm und einem Durchmesser von 18 mm ergibt sich eine Kaltkopfoberfläche von 3365 mm^2 , wobei nur 1 Stirnfläche berücksichtigt wurde.

Bei einer Höhe von 3 mm und einer Breite von 4 mm erreicht der Kühlkanal mit 6 Windungen eine Mantelfläche gleicher Größe, so daß sich das Verhältnis $A_k/A = 1$ ergibt.

Die Gestaltung des flachen Kaltkopfes, der schließlich zur Anwendung kam, ist aus Zeichnung Nr. 246.01.01.83-02 zu ersehen. Er hat eine äußere Fläche von 3450 mm^2 und eine Mantelfläche des Kanals von 2600 mm^2 . Das Verhältnis beträgt $A_k/A = 0,75$.

Obwohl der runde Kaltkopf einen günstigeren Strömungsverlauf und besseren Wirkungsgrad hat, konnte er in der Apparatur nicht untergebracht werden. Die Verluste, die durch eine längere Kupferlitze entstanden wären, hätten seine positiven Eigenschaften kompensiert.

Es folgen nun im nächsten Kapitel einige Berechnungen, die für die Auslegung des Kaltkopfes durchgeführt wurden.

3.2.1.6 Berechnungen

Wärmeleistungsverluste am Probenhalter

1. Verluste durch Strahlung

A = strahlende Fläche = 1700 mm^2
 σ = Strahlungskonstante = $5,77 \cdot 10^{-8} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
 ϵ = Emissionsvermögen = 0,1 (angenommen)
 T = Temperatur, hier Temperaturgefälle zwischen Raumtemperatur (300 K) und Kaltkopf-temperatur (100 K)
 \dot{W} = Verlustleistung

$$\begin{aligned}
 \dot{W} &= A \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4 \\
 &= 1700 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 5,77 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,1 \cdot (300^4 - 100^4) \text{ K}^4 \\
 &= 0,0785 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1 \text{ J} = 1 \text{ Ws})
 \end{aligned}$$

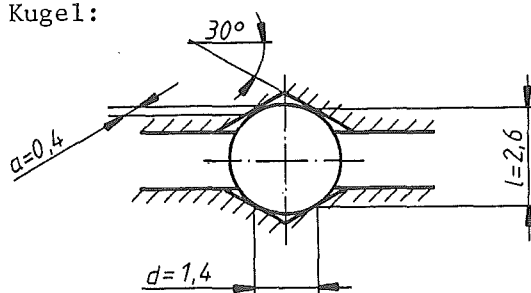
$$W = 78,5 \text{ mW}$$

=====

2. Wärmeleitungsverluste über Keramik

Abmessungen der Teile:

Kugel:



Auflagefläche, gerundet:

$$\begin{aligned}
 A &= a \cdot d \cdot \pi \\
 &= 0,4 \text{ mm} \cdot 1,4 \text{ mm} \cdot \pi = 1,76 \text{ mm}^2 \\
 \text{für 3 Kugeln: } A_1 &= 5,28 \text{ mm}^2 \\
 \ell_1 &= 2,6 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Schraubenhülse:

$$\begin{aligned}
 A_2 &= 2,47 \text{ mm}^2 \cdot 3 = 7,42 \text{ mm}^2 \\
 \ell_2 &= 1 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

A = Leitungsquerschnitt

ℓ = Leitungslänge

λ = Wärmeleitungskoeffizient, hier für Keramik = $1,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

ΔT = Temperaturgefälle = 200 K

$$\begin{aligned}
 \dot{W} &= \frac{A}{\ell} \cdot \lambda \cdot dT \\
 &= \left(\frac{A_1}{\ell_1} + \frac{A_2}{\ell_2} \right) \lambda \cdot dT \\
 &= \left(\frac{5,28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{2,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}} + \frac{7,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{1 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \right) \cdot 1,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 200 \text{ K} \\
 \dot{W} &= 3,16 \text{ W} \\
 &=====
 \end{aligned}$$

3. Temperaturverlust an der Kupferlitze

An der Isolierung der Probenbefestigung kommt es zu einer Verlustleistung von ca. 3,2 W. Diese Leistung muß der Kaltkopf mindestens aufbringen, damit die Temperatur an der Probe nicht ansteigt.

Bei der Übertragung der Wärme durch die Kupferlitze kommt es zu einem Temperaturverlust, der nachfolgend berechnet wird.

$$\begin{aligned}
 \dot{W} &= \text{auftretende Verlustleistung} &= 3,2 \text{ W} \\
 \ell &= \text{Länge der Kupferlitze} &= 40 \text{ mm} \\
 A &= \text{Querschnitt der Litze} &= 20 \text{ mm}^2 \\
 \lambda &= \text{Wärmeleitungskoeffizient, für Kupfer} &= 372 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \\
 dT &= \text{Temperaturverlust}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 dT &= \frac{\dot{W} \cdot \ell}{A \cdot \lambda} \\
 &= \frac{3,2 \text{ W} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 372 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 dT &= 17,2 \text{ K} \\
 &=====
 \end{aligned}$$

Geht man davon aus, daß der Kaltkopf eine Temperatur von 77 K hat, dann wird sich an der Probe eine Temperatur von 77 K + 18 K = 95 K einstellen.

Kühlmittelverbrauch für eine Verdampfungs-Kälteleistung von 5 W am Kaltkopf

\dot{W} = Kälteleistung durch Verdampfung = 5 W

$\frac{m}{t}$ = umgewälzte Kühlmittelmenge

q_v = Verdampfungswärme für Stickstoff aus dem T-S-Diagramm
(bei $p = 1 \text{ bar}$, $T = 77 \text{ K}$) = $1,963 \cdot 10^5 \text{ Ws} \cdot \text{kg}^{-1}$

$\frac{V}{t}$ = Durchsatzvolumen pro Zeit

ρ = Dichte von flüssigem Stickstoff (bei $p = 1 \text{ bar}$, $T = 77 \text{ K}$) =
 $0,8 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$$\dot{W} = \frac{m}{t} \cdot q_v$$

$$\frac{m}{t} = \frac{\dot{W}}{q_v}$$

$$= \frac{5 \text{ W} \cdot \text{kg}}{1,963 \cdot 10^5 \text{ Ws}}$$

$$\frac{m}{t} = 2,55 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

=====

$$\frac{V}{t} = \frac{m}{t} \cdot \frac{1}{\rho}$$

$$= \frac{2,55 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 3600 \text{ s} \cdot \text{h}^{-1}}{10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{l}^{-1} \cdot 0,8 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}$$

$$\frac{V}{t} = 0,115 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

=====

3.2.1.7 Auswahl der Werkstoffe und Beistellteile

Die Probe selbst ist für die ersten Versuche ein Platin-Einkristall. Für spätere Experimente sind auch andere Stoffe vorgesehen.

Die Proben-Befestigung, also Grund- und Klemmplatte, sollen aus Molybdän hergestellt werden. Wegen der hohen Wärmebelastung muß ein hochschmelzendes Metall gewählt werden. Molybdän wurde dem Wolfram vorgezogen, weil es leichter ist und sich besser formen läßt. Sein Schmelzpunkt liegt bei 2622 °C. Der Kaltkopf und der Klemmring für die Litze an der Probenbefestigung werden aus Elektrolyt-Kupfer hergestellt, damit die bestmögliche Wärmeleitfähigkeit erreicht wird. Die Leitfähigkeit der Kupferlitze ist schlechter. Es handelt sich hier um eine Litze, die in der Elektrotechnik für Erdungs- oder Schweißleitungen verwendet wird.

Die Isolierteile werden aus Macor gefertigt. Das ist eine bearbeitbare Glaskeramik, die sich durch hohe Temperaturwechselbeständigkeit, hohe Gebrauchstemperatur und mäßige Wärmeleitfähigkeit auszeichnet. Durch hohen spezifischen Widerstand und hohe Durchschlagfestigkeit eignet sie sich auch für die Montageplatte der Heizungs-Anschlußklemmen. Diese Keramik kann auf Dreh- und Fräsmaschinen bearbeitet werden.

Für die Azimut-Lagerung kommen Rubin-Kugeln zum Einsatz, die im Gegensatz zu Stahlkugeln gleichzeitig isolieren.

Die Heizung sowie der Wehneltzylinder sind aus Tantal hergestellt, dessen Schmelzpunkt bei 3000 °C liegt. Es hat in bezug auf die spezielle Anwendung ähnliche Eigenschaften wie Wolfram. Für die Halterung der Heizwendel kann ein handelsübliches Keramikröhrchen verwendet werden. Diese Röhrchen dienen normalerweise zur Befestigung oder Führung von Thermoelementen.

Da der Probenhalter möglichst unmagnetisch sein soll, könnte man alle übrigen Teile aus Stahl 1.3952 fertigen, der, da er bei Bau von Kriegsschiffen verwendet wird, auch den Namen "U-Boot-Stahl" hat. Dieser Werkstoff ist völlig unmagnetisch, hochfest, formstabil und nicht aktivierbar. Da der Werkstoff jedoch schwer zu beschaffen ist, kann zur Not auch auf den bewährten Edelstahl 1.4541 zurückgegriffen werden, der kaum magnetisch ist.

3.2.1.8 Anmerkungen für Fertigung und Montage

An dieser Stelle sollen einige Bezugsquellen für die Sonderwerkstoffe genannt werden.

Da Molybdän im IGV bereits für andere Zwecke eingesetzt wurde und für den

Probenhalter nur wenig benötigt wird, könnte dieser Werkstoff dort abgefaßt werden. Gleiches gilt für die Kupferlitze, die dort im Lager in verschiedenen Abmessungen vorrätig ist.

Elektrolytkupfer und Edelstahl 1.4541 müßten in der KFA vorrätig sein. Eventuell auch in geringen Mengen U-Boot-Stahl 1.3952, da dieser Werkstoff früher bereits verwendet wurde.

Die Macor-Glaskeramik vertreibt die Firma Fiber-Optic AG, Spreitenbach/Schweiz. Kugeln aus diesem Material könnte die Firma Sperric in Ravensburg fertigen.

Rubinkugeln stellt die Firma E.F. Weinz in Idar-Oberstein her. Keramik-Röhrchen sind von der Firma Haldenwanger in Berlin zu beziehen.

Zur Montage ist folgendes anzumerken: Beim Azimut-Lager wird der Innenteil in den äußeren Ring hineingehalten. Dann werden die Kugeln von der Unterseite eingefüllt und schließlich der bewegliche Ring aufgesteckt und befestigt. Dieser Ring ist durch Abdrehen der Oberkante so anzupassen, daß eine einwandfreie Führung der Kugeln gewährleistet ist. Schließlich wird der Ring mit Hilfe der Mutter fixiert.

Die Heizung wird, komplett mit Wehmelzylinder, auf der Querstrebe montiert und dann im Probenhalter festgeschraubt.

Die Bohrungen für die Querstifte zur Befestigung der Achsbolzen werden erst nach Einsetzen der Bolzen ausgeführt, damit eine einwandfreie Anpassung möglich ist.

Positionen der Zeichnung Nr. 246.01.01.83-01

Pos.	Benennung	Bemerkung	Werkstoff
1	Seilumlenkrolle	Azimet-Seilzug	1.4541
2	Befestigungsachse		1.4541
3	Haltebolzen		1.4541
4	drehbar gelagerter Einsatz	Azimet-Rotation	1.3952
5	Kupferring	zur Wärmeableitung	E-Kupfer
6	Isolierkugeln		Glaskeramik
7	Befestigungsschrauben	isoliert montiert	1.4541
8	Lagerkugeln	Azimetlager	Rubin
9	Probe	Einkristall	Platin
10	Probenheizung	Heizwendel	Tantal
11	Klemmplatte	Probenbefestigung	Molybdän
12	Grundplatte	Probenbefestigung	Molybdän
13	Klemmvorrichtung	für Kupferlitze	E-Kupfer
14	Klemmschraube	für Azimet-Seilzug	1.4541
15	Wehnelt-Zylinder		Tantal
16	Heizungshalter	Keramikröhrchen	Keramik
17	Führungsstange, Aufhängung	Gelenkgetriebe, Tilt	1.4541
18	Befestigungsschrauben	Heizungsanschlußklemme	1.4541
19	Seil-Umlenkrolle		1.4541
20	Koppelverlängerung, Aufhängung	Gelenkgetriebe, Tilt	1.4541
21	Gehäuse		1.3952
22	Justierung, Gegenführung	Azimet-Lager	1.3952
23	drehbar gelagerter Einsatz		1.3952
24	Haltestift	für Achsbolzen	1.4541
25	Befestigungsschrauben		1.4541
26	Klemmschuhe	für elektr. Anschluß der Heizung	Kupfer
27	Montageplatte	für Heizungsklemmen	Glaskeramik
28	Achsbolzen	Befestigung der Aufhängung	1.4541
29	Kugellager	für Seilrolle	1.4541
30	Abstandsring		1.4541
31	Kugellager	für Gelenkgetriebe	1.4541
32	Abschlußscheibe	zur Befestigung	1.4541

3.2.2 Tilt-Mechanismus und Seilrollenführung

3.2.2.1 Geforderte Funktion

Aufgabe dieser Baugruppe ist es, die Tilt-Bewegung auszuführen, also die Verschiebung des Seilzuges in eine Rotationsbewegung des Probenhalters um das Zentrum der Probenoberfläche umzuwandeln. Die Drehbewegung beträgt dabei maximal $\pm 45^\circ$. Damit verbunden ist eine entsprechende Aufhängung des Probenhalters.

Eine weitere Aufgabe besteht darin, den Seilzug für die Azimut-Rotation mittels Führungsrollen so umzulenken, daß eine Drehbewegung in jeder Tilt-Position möglich ist.

3.2.2.2 Gestaltung der Seilführung

Die Entscheidung, die Tilt-Bewegung über eine Viergelenkkette zu realisieren, fiel bereits sehr früh, und es gab später keinen Grund mehr, davon abzugehen. Nun mußte jedoch das Azimut-Seil entlang dieser Gelenkkette geführt werden. Seilumlenkrollen können im Prinzip nur dort angebracht werden, wo sich ihr Abstand bei der Bewegung der Gelenkkette zueinander nicht ändert. Das Seil hat ja eine bestimmte Länge, bedingt durch die Gestaltung des Führungsweges. Und dieser Weg darf sich nicht verlängern oder verkürzen, weil sonst eine reproduzierbare Bewegungsübertragung nicht gewährleistet ist.

Leitet man das Seil entlang der starren Führungsstangen und setzt die Rollen genau in deren Gelenkpunkte, so wird die Bedingung erfüllt, denn eine Änderung des Abstandes zwischen den Rollen ist nicht möglich.

Nun ist dies eine ideale Betrachtungsweise, die nur dann gilt, wenn das Seil um den Radius Null umgelenkt wird. Es muß jedoch hier wegen des Einsatzes im Ultrahochvakuum, ein Stahldrahtseil verwendet werden, bei dem wegen mangelnder Flexibilität ein Mindestbiegeradius nicht unterschritten werden darf. Bei dem verwendeten Seil - ein besseres wurde nicht gefunden - beträgt der Radius 6 mm. Der Durchmesser der Rollen muß also mindestens 12 mm sein.

Bei der Bewegung der Gelenkkette ändert sich der Umschlingungswinkel des Seils an den verschiedenen Rollen. Die Darstellung des Endausschlages bei

plus und minus 45° in der Zeichnung Nr.. 246.01.01.83-02 der ausgeführten Anordnung zeigt dies deutlich. Es kommt also infolge dieses Effektes doch zu einer Änderung des Seilweges. Diese Änderung ist umso größer, je größer der Rollendurchmesser und damit gleichzeitig der Umfang der Rolle ist. Bei Rollendurchmesser 12 mm beträgt diese Änderung mehrere Millimeter.

Nun wird hier ein umlaufendes Seil verwendet. Wenn die Seilführung symmetrisch angeordnet ist, d.h. für Hin- und Rückweg gleicher Verlauf des Seiles, dann kommt es auch auf Hin- und Rückweg zur gleichgroßen Änderung. Ordnet man eine Seilspann-Vorrichtung so an, daß sie gleichzeitig auf Hin- und Rückweg die Änderung kompensiert, dann macht das Seil keine Eigenbewegung. Die Einstellung des Azimutwinkels bleibt also konstant.

Nachdem dieser Effekt erkannt worden war, mußten weitere Probleme gelöst werden. Es mußte eine Kopplung des Tilt-Antriebsseiles mit der Viergelenkkette geschaffen werden und gleichzeitig war zu überlegen, wie der weitere Verlauf des Azimut-Seiles gestaltet würde. Dabei sollten so wenig Rollen wie möglich benötigt werden.

Die jetzt verwendete Lösung, den Tilt-Antrieb über eine große Seilrolle zu koppeln, wurde erst herangezogen, nachdem andere Entwürfe gescheitert waren. Da im Prinzip nur eine Drehung um maximal 90° ermöglicht werden mußte, wurde versucht, ein kreissektorförmiges Führungsteil für das Seil zu verwenden. Dieser Mechanismus hätte komplett unterhalb der Befestigungsplatte gelegen, so daß auf der Oberseite mehr Platz für die Führung des Azimut-Seiles zur Verfügung gestanden hätte. Abb. 10 zeigt eine solche Anordnung.

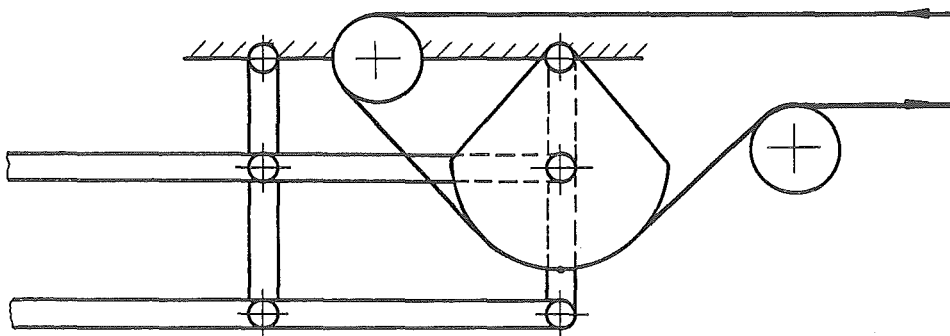


Abb. 10: Ursprünglich vorgesehene Seilführung für Tilt-Antrieb

Da auf diese Weise aber eine teilweise unlineare Übertragung entstanden wäre, die keinesfalls riskiert werden durfte, wählte ich schließlich doch eine kreisförmige Rolle, die allerdings mehr Platz beansprucht.

Der Azimut-Seilzug muß an dieser Rolle beidseitig vorbeigeführt werden. Dies ist bei der Konstruktion von Rollenlagerung und Kopplungsmechanismus zu berücksichtigen.

Bevor nun die ausgeführte Lösung dieser Baugruppe beschrieben wird, folgen im nächsten Abschnitt einige Anmerkungen zur Viergelenkkette.

3.2.2.3 Theoretische Grundlagen der Viergelenkkette

Der gewählte Antrieb der Tilt-Bewegung gehört in die Gruppe der Gelenkgetriebe. Er ist aus dem Gelenkviereck hervorgegangen:

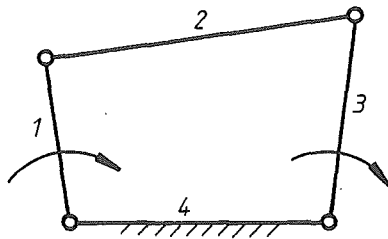


Abb. 11: Viergelenkkette

- 1 Antriebslenke
- 2 Koppel
- 3 Abtriebslenke
- 4 Steg

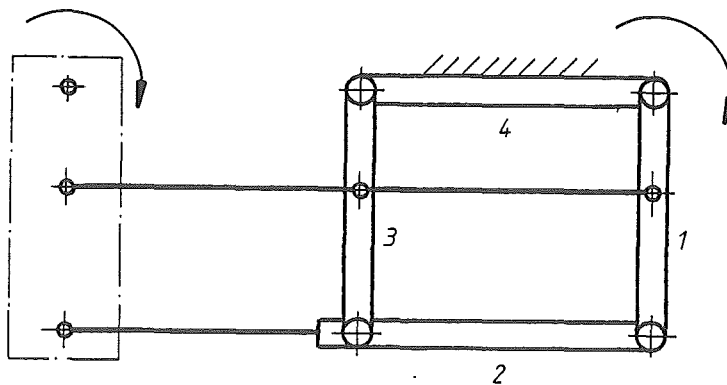


Abb. 12: Entwicklung des Tilt-Getriebes aus der Viergelenkkette

Ein Getriebe ist zwangsläufig, wenn es den Freiheitsgrad $f = 1$ hat. Zwangsläufigkeit bedeutet, daß die Bewegung des Antriebs eine ganz bestimmte Bewegung des Abtriebs zur Folge hat.

Die Zwangsläufigkeit wird nach folgender Formel bestimmt:

$$f = 3n - 2g - 3$$

Dabei ist:

f = Anzahl der Freiheitsgrade

n = Anzahl der Glieder, einschließlich Steg

g = Anzahl der Gelenke

In diesem Fall

$$f = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 4 - 3 = 1$$

Durch die Anbringung des Zusatzgliedes ändert sich die Anzahl der Freiheitsgrade nicht, denn die zugehörigen Gelenke sind nicht vollwertig, d.h. sie ermöglichen dem Getriebe keine zusätzlichen Bewegungen.

Durch die Verlängerung der Koppel und die Anbringung des Führungsgliedes ist es möglich, die Bewegung der Abtriebslenke parallel an eine andere Stelle zu verschieben.

Ein Teil, das die Bewegung der Abtriebslenke nachvollziehen soll, muß genau parallel zu dieser montiert werden, ansonsten wird die Bewegung der ganzen Kette blockiert. Diese Anordnung ist überhaupt nur bei einer Sonderform der Viergelenkkette möglich dem Parallelkurbeltrieb, bei dem An- und Abtriebslenke gleichgroß sind. Dieser Fall liegt hier vor.

Das Zusatzteil, in diesem Fall der Probenhalter, dreht sich um einen Punkt, der genau in der verlängerten Ebene des Steges liegt. Genau an dieser Stelle muß die Probenoberfläche angeordnet sein.

3.2.2.4 Beschreibung der verwendeten Lösung

Die Montage- oder Befestigungsplatte dieser Baugruppe wird aus Rundmaterial herausgearbeitet. Am oberen Ende (gemäß Einbaurichtung) ist zunächst eine Klemmvorrichtung vorgesehen, mit der die Befestigung an der Hohlwelle erfolgt, die die Hauptrotation überträgt. Die hier beschriebene Baugruppe macht bekanntlich diese Bewegung mit.

Die Welle wird am Ende in diese Klemmvorrichtung hineingeschoben, die als Passung ausgeführt ist. Ein Schlitz und eine Schraube ermöglichen es, daß der die Welle umfassende Halbring leicht zusammengedrückt wird, so daß eine relativ feste Verbindung entsteht, die aber andererseits auch wieder leicht zu lösen ist.

Nach der Klemmvorrichtung folgt ein Rollenkäfig, der ebenfalls aus vollem Material herausgearbeitet ist.

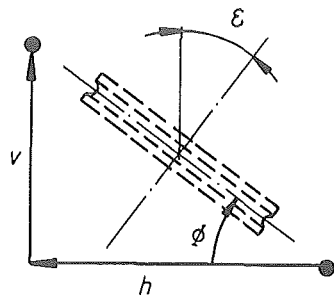
Diese Rollen haben zusammen mit einer Rollenanordnung im Getriebekasten die Aufgabe, die Seilzüge innerhalb der Hohlwelle zu führen.

Für eine leichte Bewegung der Rollen sorgen Miniaturkugellager, die durch Preßpassung in den Rollenkörper integriert sind. Die Lager laufen auf Achsen, die schraubenförmig gestaltet sind. Den Aufbau des Rollenkäfigs zeigt der Schnitt I-J in der Zeichnung Nr. 246.01.01.83-02. Es ist zu sehen, daß zwei Rollen in einem Winkel zur horizontalen Ebene angeordnet sind, obwohl sie das Seil genau in dieser Ebene führen. Der Grund dafür ist, daß das Azimut-Seil an dieser Stelle aus der zur Mittelachse symmetrischen Ebene herausgeführt wird. Bereits vorher wurde gesagt, daß das Seil entlang des beweglichen Tilt-Gestänges läuft. Dazu müssen die Rollen in den Gelenkpunkten des Gestänges angeordnet sein. Da sich der Steg der Gelenkkette, also der feststehende Teil, in einer Ebene befindet, durch die die Mittelachse des Manipulators verläuft, muß eine Seilrolle ebenfalls in dieser Ebene befestigt sein. Um den Betrag des Radius dieser Rolle muß das Seil aus seiner bisherigen Ebene herausgeleitet werden. Gleichzeitig erfolgt eine seitliche Verschiebung, die bei der gewählten Konstruktion erforderlich ist. Die schräge Rollenanordnung im Käfig ermöglicht diese Seilführung.

Der Anstellwinkel der Rollen wird folgendermaßen ermittelt. In eine Ebene, zu der das Seil senkrecht verläuft, projiziert man die horizontale und vertikale Verschiebung des Seils, also den Berührungspunkt mit dieser Rolle und den mit der nächsten.

Hinter dem Rollenkäfig erfolgt also die Verschiebung des Seils aus der Mittelebene. Ein weiteres Rollenpaar, das ebenfalls leicht schräg angeordnet ist, der Kippwinkel ε beträgt $2,5^\circ$, leitet das Seil gerade auf Umlenksrollen, die es nun in den beweglichen Teil überführen.

Ermittlung
des Rollen-
anstellwinkels:



$$\tan \phi = \frac{v}{h}$$

in diesem Fall:

$$\tan \phi = \frac{6 \text{ mm}}{11 \text{ mm}} = 0,545$$

$$\phi = 28,6^\circ \quad \epsilon = 71,4^\circ$$

Es folgt der Seilspanner für das Azimut-Seil. Diese Spannvorrichtung übt mit Hilfe einer gewundenen Biegefeder eine Kraft auf das Seil aus. Da sie hin- und herpendeln kann, ist sie in der Lage eine Änderung der Seil-Weglänge auszugleichen. Durch die Feder, die in der Drehachse des Pendels angebracht ist, hat dieses das Bestreben, sich gemäß Einbaurichtung nach oben zu bewegen. Der Schnitt E-F in Zeichnung Nr. 246.01.01.83-02 zeigt die Anordnung und Gestaltung des Spannpendels. Aus den Darstellungen der ausgelenkten Lagen sieht man die Wirkungsweise. Der Seilspanner sollte zuerst im Drehpunkt der Abtriebslenke angebracht werden. Damit die Anordnung des Gelenkgetriebes stabil ist, wurde die Abtriebslenke jedoch gabelförmig gestaltet. Gleichzeitig sind die beiden Koppelverlängerungen durch ein Fachwerk miteinander verschraubt. Diese Maßnahme verhindert eine Verdrehung oder Verwindung innerhalb des Gelenkgetriebes. Die Anordnung der Abtriebslenken zeigt Schnitt C-D.

Durch die eben beschriebene Gestaltung mußte der Seilspanner versetzt angeordnet werden. Er folgt jedoch weitgehend der Bewegung der Gelenkkette und wirkt dabei korrigierend auf das Seil ein.

Durch diese Anordnung werden zwar Bedingungen, die in Abschnitt 3.2.2.2 "Gestaltung der Seilführung" genannt sind, nicht mehr erfüllt, aber die Verwendung von Rollen mit Durchmesser 12 mm führt weg von idealen Voraussetzungen, und infolge der entstehenden Fehler müssen Kompromisse eingegangen werden. Die angestrebte Funktionsweise kann durch diesen Aufbau erreicht werden. Der Seilspanner soll ferner Längenänderungen des Seils ausgleichen, die durch Temperatureinflüsse, Alterung usw. entstehen.

Nach dem Seilspanner läuft das Seil auf Rollen, die an den unteren Achsbolzen des Probenhalters angebracht sind. Die letzte Umlenkung führt dann genau in die Ebene der Seilrolle am Probenhalter, die schließlich die Azimut-Drehung ausführt. Das Seil kann dort mittels einer Schraube geklemmt werden, damit kein Schlupf entsteht. Der Weg des Tilt-Antriebsseils ist we-

niger aufwendig. Hinter dem Rollenkäfig, am Ende der Hohlwelle, läuft es gleich auf die große Abtriebsrolle, die mit der Antriebslenke des Tilt-Getriebes über einen Bolzen verbunden ist. Die Anordnung an dieser Stelle zeigt der Schnitt G-H. Das Seil wird auch hier mit einer Schraube festgeklemmt. Die Klemmschrauben auf Azimut- und Tiltrolle sind genau in der Mitte der Führungsbahn angeordnet. Das Seil muß in einer Schlaufe darum gelegt werden. Die Tiltrolle hat genau den doppelten Durchmesser der Azimutrolle, damit geradzahlige Übersetzungsverhältnisse entstehen. Mit der größeren Rolle kann der Tilt-Winkel noch genauer eingestellt werden. In dieser Rolle ist wieder ein Kugellager befestigt, das mittels Preßpassung eingesetzt wird.

Um dem größeren Bohrungsdurchmesser dieses Lagers gerecht zu werden, sitzt auf der durchgehenden Achse, die auch die Antriebslenke trägt, im Bereich der Seilrolle eine Büchse.

Der Verbindungsbolzen zwischen Seilrolle und Antriebslenke sitzt so weit wie möglich vom Rollenzentrum entfernt, damit ein günstigeres Drehmoment bei der Übertragung entsteht.

Die Aufhängungen und Ausführungen der Gelenkverbindungen am Tilt-Getriebe erfolgen mittels Miniaturkugellager, die wie auch bei allen Seilrollen eingepreßt sind. Die Sicherung auf den Achsen bzw. Achsbolzen am Probenhalter geschieht über Abschlußscheiben, die durch axial angeordnete Schrauben befestigt werden. Sicherungsringe in dieser Größe aus Edelstahl waren nicht zu bekommen bzw. hätten in Stückzahlen von mehreren tausend abgefaßt werden müssen. Die zur Koppel parallellaufenden Führungsstangen werden im Bereich zwischen Abtriebslenke und Probenhalter nach unten gezogen. Dies geschieht, damit bei einer Azimut-Bewegung in ausgelenkter Tilt-Lage die Kupferlitze des Kühlsystems nicht behindert wird und damit die Probe auch in dieser Lage frei zugänglich ist.

3.2.2.5 Auswahl der Werkstoffe und Beistellteile

An die zu verwendenden Miniatur-Kugellager für die Seilrollen und Gelenke des Tilt-Getriebes werden erhöhte Anforderungen gestellt. Die Lager müssen trocken laufen und einer Temperatur von 250 bis 300 °C beim Ausheizen standhalten. Weiterhin muß wegen der geforderten Präzision insbesondere bei den Lagern des Gelenkgetriebes eine höhere Toleranzklasse gewählt werden. Der Bohrungsdurchmesser der Lager liegt im Bereich 2 bis 5 mm.

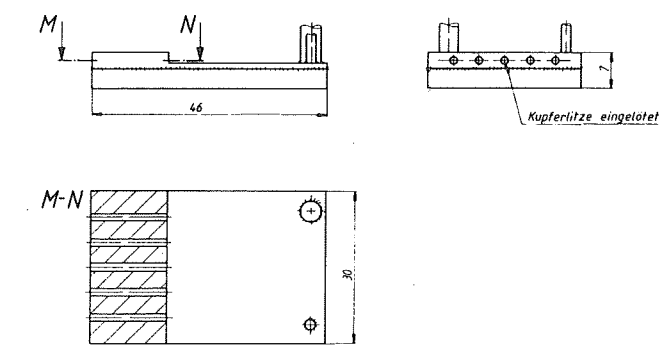
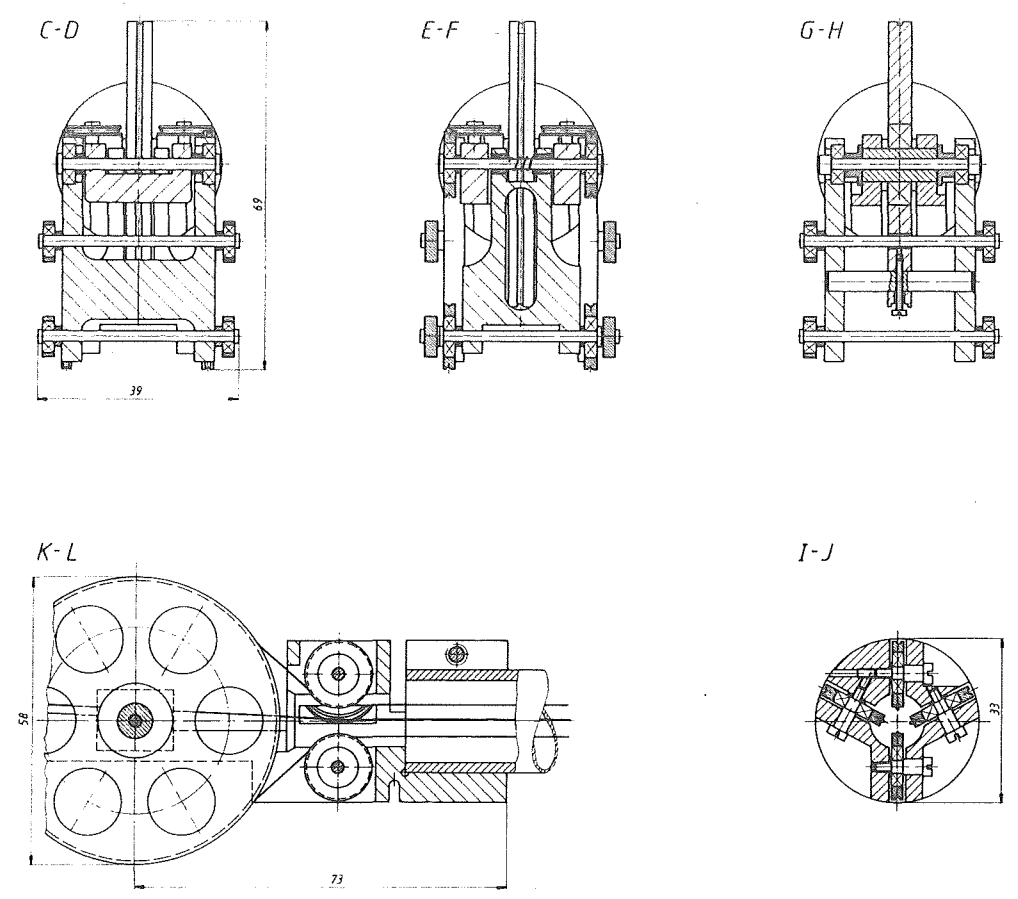
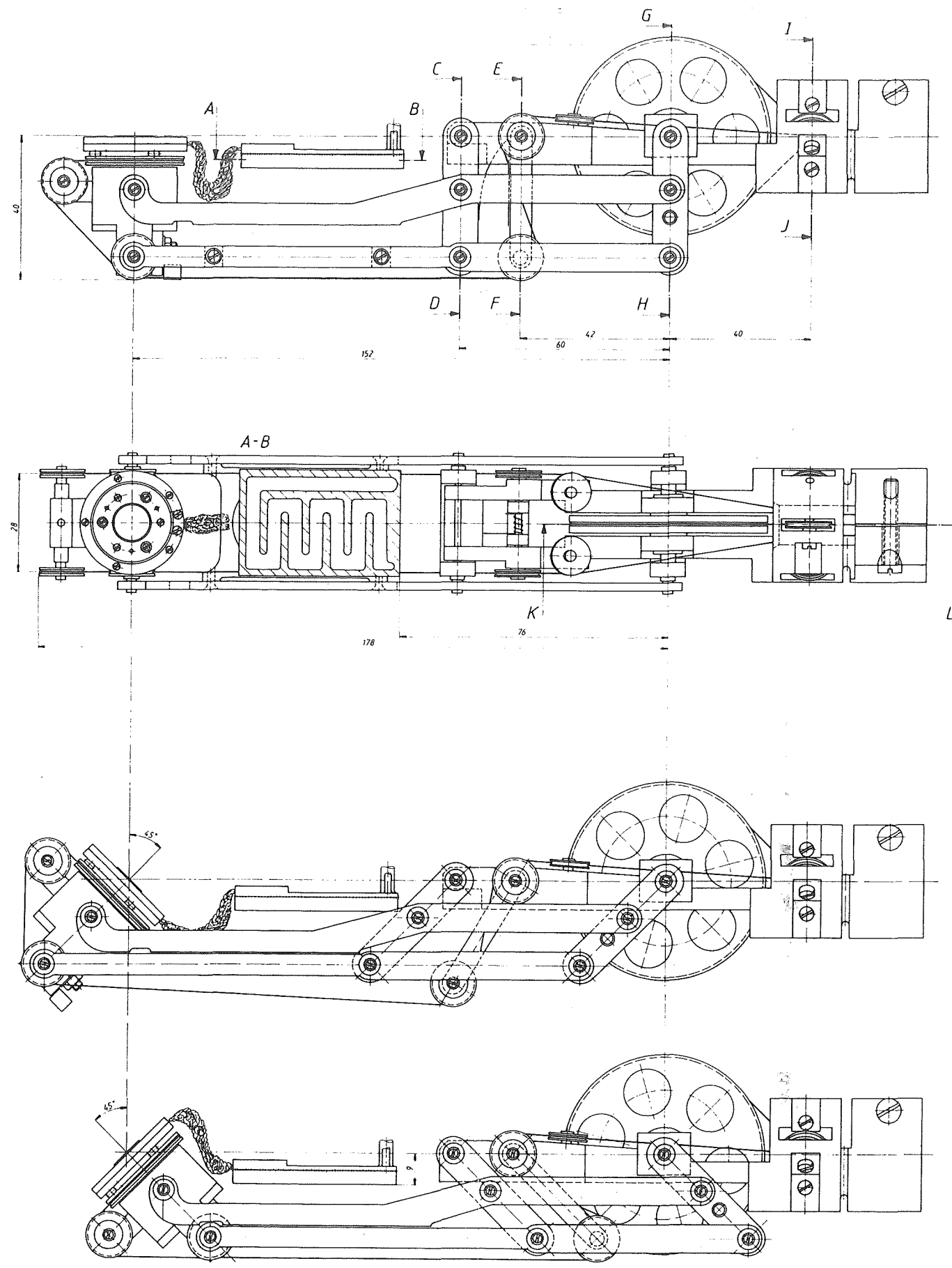
Da die Kugellager nicht sonderlich stark belastet werden und überwiegend nur Winkelbewegungen, also keine ganzen Umdrehungen, machen, kann man normale Präzisionslager ohne Schmierung verwenden und benötigt keine speziellen UHV-Lager. Bei der Werkstoffwahl wurde zuerst an Kupfer-Berylliumlager gedacht. Kugellager aus dieser Legierung haben sich bereits im UHV bewährt, insbesondere auch bei der Erwärmung durch Ausheizen. Außerdem ist dieser Werkstoff unmagnetisch, was besonders für die Lager in der Nähe der Probe wichtig ist. Da diese Lager jedoch ziemlich teuer sind, soll nun doch auf Edelstahl-Miniaturlager zurückgegriffen werden, deren Preis um einiges kleiner ist und die laut Herstellerangabe ebenfalls die geforderten Bedingungen erfüllen.

Die Suche nach einem geeigneten Seil für den Einsatz in der Apparatur verlief nicht ganz einfach. Es kommt im Grunde nur ein Edelstahl-Drahtseil in Frage, das möglichst dünn ist und maximale Flexibilität aufweist. Ferner muß es der Ausheiztemperatur gewachsen sein. An die Belastbarkeit werden keine hohen Ansprüche gestellt, da die auftretenden Kräfte im Bereich von einigen Newton liegen.

Bei der Suche nach Bezugsquellen für ein geeignetes Seil wurde als flexibelste Ausführung eine Konstruktion 17 x 19, mit 133 Einzeldrähten und einem Durchmesser von 0,9 mm aus Werkstoff 1.4401 angeboten. Da der Durchmesser dieses Seils noch als reichlich groß für den geplanten Einsatz angesehen wurde, wählte ich schließlich ein weniger flexibles Seil mit der Konstruktion 7 x 7, also 49 Einzeldrähte, Durchmesser 0,45 mm, ebenfalls aus Edelstahl 1.4401. Dieses Seil ist aus vakuumtechnischen Gesichtspunkten heraus als günstiger anzusehen, weil es eine weniger große Oberfläche hat, von der Gase desorbieren, und weil es vielleicht weniger dazu neigt, innerhalb des Drahtgeflechtes Gase einzuschließen.




Der Mindestbiegeradius eines solchen Seils sollte 10 bis 20 mal so groß sein wie der Seildurchmesser. Dabei ist zwar ein Rollendurchmesser von 12 mm ziemlich knapp bemessen, aber das Seil wird relativ langsam bewegt und nicht sehr stark belastet, so daß ein erhöhter Verschleiß nicht erwartet wird.

Die gewundene Biegefeder für den Azimut-Seilspanner ist aus rostfreiem Federstahl 1.4310 hergestellt. Sie hat einen Federweg von 52° und kann



Kaltkopf in drei Ansichten

Dieser Plan ist eine Kopie und darf nicht ohne Genehmigung des Erfinders ververvielt werden.

Scharfe Kanten 0,4 gebrochen										Auftrags-Nr.		10 49 17		1983	Tag	Name	Benennung		Maßstab		
Angaben zur Oberflächenbeschaffenheit nach DIN ISO 1302														gez.	24.02.83		Tilt - Mechanismus und Seilführung			2:1	
Freumitteltoleranz DIN 7168 m S														geprüft	21.2.83						
														Nom.		Kst 883					
																					
Nennmaß bereich in mm		0,5	6	30	120	400	1000	2000	2000								Zeichnungs-Nr.	Formal			
		bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis								246.01.01.83 - 02	0			
Abweichung für Langgenauigkeit		±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2													
Abweichung für Ebenheit und Formtol. in mm		0,008	0,02	0,04	0,08	0,15	0,2	0,3	Änder Buchst.		Kompl. a vor	Änderungsangabe	Tag	Name	Änder- Karte-Nr.		Ersatz für	Plause Nr.			
																	Ersatz durch				

eine Kraft von ca. 25 N aufnehmen.

Alle übrigen Teile dieser Baugruppe werden aus Edelstahl 1.4541 hergestellt.

3.2.2.6 Anmerkungen zu Fertigung und Montage

Präzisionslager aus Kupfer-Beryllium stellt die Firma MPB Corporation in USA her, sie können über das Verkaufsbüro in Leutkirch bezogen werden. Miniaturlager verschiedener Hersteller aus Edelstahl vertreibt die Firma Blässiger in Stuttgart.

Feindrahtseil aus Edelstahl bieten die Firmen Ahlers in Bremerhafen, Seeling in Delmenhorst und Engelmann in Hannover an. Firma Gutekunst in Metzingen stellt die benötigte Feder her.

Zur Montage ist zu sagen, daß speziell an den durchgehenden Achsen die Teile in der Reihenfolge von innen nach außen angebracht werden. Für die Achse der Tilt-Rolle und Antriebslenke bedeutet dies, daß zuerst die Rolle auf die Büchse gesteckt wird, dann folgen die Abstandshalter. Schließlich wird die Achse durchgeschoben, an der die Antriebslenken hängen, und zum Schluß schraubt man die Abschlußplättchen an.

Die Baugruppe wird komplett mit Probenhalter montiert, bevor sie an der drehbaren Welle befestigt wird. Zweckmäßigerweise sollten die Seile vorher eingezogen werden.

3.2.3 Führungsrohr mit Übertragungselementen für Rotationen

Bei den nachfolgend noch zu beschreibenden Baugruppen ergab sich die Lösung aus der bis hier beschriebenen Anordnung bzw. aus dem Aufbau der Apparatur. Eine Lösungsfindung fand nicht statt und braucht deshalb auch nicht beschrieben zu werden.

3.2.3.1 Aufgabe der Baugruppe

Dieses Teil dient dazu, die Verbindung zwischen dem Antriebssystem der Bewegungen und der ausführenden Baugruppe herzustellen. Es ist innerhalb des Kreuzschlittens für die X-Y-Translation aufgehängt und folgt dessen

Bewegungen. Im Innern des Rohres selbst befinden sich die Übertragungselemente für die drei Rotationen. Es ragt als Führungsrohr in die Molekularstrahlapparatur hinein und trägt den Probenhalter samt Aufhängung wie eine Sonde.

3.2.3.2 Beschreibung

Die Anordnung ist aus der Zusammenstellungszeichnung Nr. 246.01.01.83 zu ersehen. In den X-Y-Kreuzschlitten ragt von unten ein Stutzen als Verlängerung des Membranbalgs hinein, der im oberen Führungsschlitten für die Y-Translation durch drei Bolzen befestigt ist.

In diesem Teil, das im übernächsten Kapitel näher beschrieben wird, ist das Führungsrohr eingeschraubt und wird durch eine Verstrebung ca. 60 mm tiefer zusätzlich abgestützt. Dieses Führungsrohr aus Edelstahl hat einen Durchmesser von 45 mm und eine Wandstärke von 2 mm. Es ist etwa 800 mm lang. Über das ganze Rohr verteilt sind Bohrungen angebracht, die der Entlüftung dienen, damit die Evakuierung der Apparatur beschleunigt oder zumindest erleichtert wird. Speziell für den UHV-Bereich sind die Bohrungsdurchmesser im Grunde zu klein, um eine merkbare Verbesserung zu bringen. Aber die mechanische Festigkeit des Rohres darf nicht eingeschränkt werden, deshalb kommen größere Löcher nicht in Frage.

Am Ende des Führungsrohrs befindet sich ein Kugellager zur Aufnahme der drehbaren Hohlwelle. Das zweite Lager ist innerhalb des Rotationsgetriebekastens angeordnet. Diese Lager werden in der KFA hergestellt. Sie sind

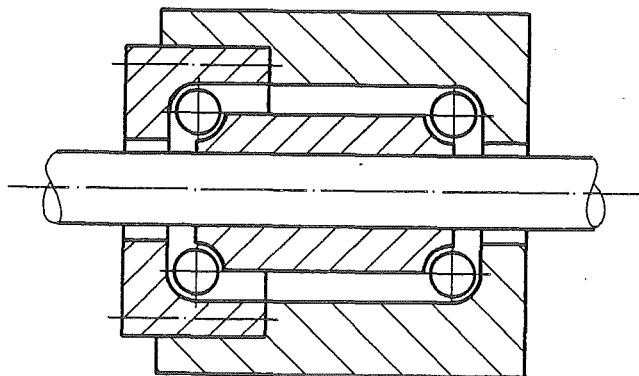


Abb. 13: Anordnung des Lagers der Hauptrotationswelle

für den UHV-Betrieb speziell vorgesehen, laufen also trocken und halten der Ausheiztemperatur stand. Zur Verbesserung der Gleiteigenschaften sind die Führungsbahnen aus Stahl, die Wälzkörper aus Kupfer-Beryllium. Abb. 13 zeigt den Aufbau des Lagers.

Bei der hohen Temperatur können keine gehärteten Führungsbahnen eingesetzt werden. Um ein Eindringen der Kugeln in die Führung zu vermeiden bzw. dessen Wirkung herabzusetzen, ist die Lauffläche an die Kugelform angepaßt, so daß sich eine möglichst große Auflagefläche ergibt. Das Lager ist für geringe Belastung und kleine Drehzahlen vorgesehen. Eine Berechnung der Tragfähigkeit und Lebensdauer ist nicht erforderlich, da die Bewegung des Lagers extrem langsam erfolgt und nicht umlaufend ist. Belastet wird das Lager nur durch die Gewichtskraft, die die Hohlwelle und der daran befestigte Bewegungsmechanismus mit Probenhalter aufbringt. Das Gewicht dieser Anordnung wird maximal 2 kg betragen. Die Gewichtskraft verteilt sich auf 25 Kugeln je Führung.

Die Hohlwelle, ein Edelstahlrohr mit 20 mm Außendurchmesser und 4 mm Wandstärke, ragt an beiden Enden über das Führungsrohr hinaus. Oben wird sie von dem zweiten im Getriebekasten angeordneten Lager geführt. Dieses Lager ist als Loslager ausgelegt. Damit die Welle auf dem inneren Lagerring des unteren Lagers aufliegt, ist sie in diesem Bereich um 2 mm abgesetzt. Am Ende steckt die Welle in der Halterung der Tilt-Getriebeanordnung. Auch entlang der Welle sind Entlüftungsbohrungen vorgesehen.

Innerhalb der Welle sind die Drahtseile für Tilt- und Azimut-Bewegung des Probenhalters geführt. Die Anordnung erfolgte mit Rücksicht auf die Verdrehung der Seile symmetrisch zur Mittelachse. Die Gestaltung und Funktion der Bewegungsübertragung wird in Abschnitt 2.2.3 beschrieben. Grundlegende Gedanken, die zur Ausführung dieses Konzeptes erforderlich waren, sind im vorletzten Abschnitt des Kapitels 2.1 ausgeführt.

Gemäß Kapitel 2.1 soll nun bei der gegebenen Anordnung konkret die Verlängerung des Seilweges bei der Verdrehung berechnet werden.

3.2.3.3 Berechnung

u = Strecke des Kreisbogens, den das Seilende beschreibt

R = Abstand des Seils von der Mittelachse

l = Seillänge in nicht verdrehter Anordnung zwischen den beiden Rollen

l' = Seillänge bei Verdrehung

$$\phi = \pm 135^\circ \rightarrow \hat{\phi} = \pm 2,356 \text{ rad}$$

$$R = 3 \text{ mm}$$

$$\ell = 1010 \text{ mm}$$

$$u = \hat{\phi} \cdot R$$

$$= 2,356 \text{ rad} \cdot 3 \text{ mm}$$

$$u = 7,068 \text{ mm}$$

$$\ell' = \sqrt{\ell^2 + u^2}$$

$$= \sqrt{1010^2 + 7,068^2}$$

$$\ell' = 1010,024 \text{ mm}$$

$$\Delta\ell = \ell' - \ell$$

$$\Delta\ell = 0,024 \text{ mm}$$

=====

3.2.3.4 Werkstoffe, Beistellteile und deren Bezugsquellen

Die Edelstahlrohre aus 1.4541 sind kaltgefertigt und wärmebehandelt. Es handelt sich um nahtlose Rohre nach DIN 17440. Sie können von der Mannesmann Edelstahl GmbH in Solingen bezogen werden. Die Weiterbehandlung erfolgt in der KFA. Die Teile des Kugellagers mit Ausnahme der Wälzkörper werden ebenfalls in der KFA aus Edelstahl 1.4541 gefertigt. Präzisionskugeln aus Kupfer-Berillium fertigt die Firma Sperric in Ravensburg, wobei der Werkstoff angeliefert werden muß.

3.2.4 Getriebekasten für Rotationen

3.2.4.1 Geforderte Funktionen

Aufgabe dieses Teils der Apparatur ist es, die Bedienung der drei Rotationsbewegungen von außen zu ermöglichen. An Präzisions-Drehdurchführungen werden die gewünschten Winkel eingestellt. Die Position wird ins Vakuum übertragen. Ein spezielles Getriebe setzt die zugehörigen Drehbewegungen so um, daß sie über die bereits besprochenen Übertragungselemente, Hohlwelle, Seilzüge, an der Probe ausgeführt werden können.

3.2.4.2 Beschreibung der Baugruppe

Die Beschreibung stützt sich auf die Darstellung in der Zusammenstellungszeichnung Nr. 246.01.01.83. Zuerst soll etwas über die Flanschverbindung zwischen Getriebekopf und der übrigen Apparatur gesagt werden.

Da die seitlichen Abmessungen des Manipulators in einem gewissen Bereich durch die Aufbauten der Z-Hubvorrichtung begrenzt sind, kann der X-Y-Kreuzschlitten nicht beliebig breit gebaut werden, so daß auch die mittlere Öffnung nur einen Durchmesser von 70 mm hat. Infolgedessen kann das Führungsrohr mit Probenhalter nicht fest mit dem Getriebekopf verbunden sein und von oben durch den Kreuzschlitten hindurchragen, sondern es muß von unten befestigt werden. Es ist also eine lösbare Verbindung erforderlich.

Die Öffnung mit 70 mm Durchmesser kann maximal einen CF-Flansch NW 35 aufnehmen. Da der Getriebekopf einen Durchmesser von 100 mm haben muß und demontierbar sein sollte, ist also ein Flansch-Reduzierstück von CF NW 100 auf NW 35 erforderlich. Weil ein solches Reduzierstück eine Länge von 70 bis 100 mm hat, die Anordnung jedoch so kurz wie möglich ausgeführt werden sollte, habe ich mich entschlossen, eine platzsparendere Gestaltung der Verbindung zu wählen:

Ausgangspunkt ist ein Blindflansch CF NW 100. Auf dessen Druckseite wird eine Dichtlippe zur Aufnahme einer Kupferdichtung mit den Abmessungen für CF NW 35 eingearbeitet. Neben einer Mittelbohrung, Durchmesser 22 mm, durch die die Hohlwelle für die Hauptrotations-Übertragung hindurch paßt, sind innerhalb des Dichtrings noch sechs Bohrungen für Schrauben angeordnet. Die Anpreßkraft wird also hier nicht wie sonst üblich außerhalb der Dichtung, sondern innerhalb aufgebracht. Es werden Schrauben mit UNF-Gewinde (Unified-Fine Thread Series) nach amerikanischer Norm verwendet, die für den Einsatz an CF-Flanschverbindungen NW 35 vorgesehen sind. Die Abmessungen des Gewindes sind mit M6 vergleichbar. Der Schraubenkopf ist jedoch kleiner gestaltet, was für die Verwendung den Ausschlag gab. Die Schrauben sitzen innerhalb des Vakuumbereichs. Bei der Montage des Getriebekopfes ist deshalb eine bestimmte Reihenfolge einzuhalten.

Auf diesen modifizierten Blindflansch wird auf der NW-100-Seite ein aus Rundmaterial herausgearbeitetes Teil aufgeschraubt, das zur Aufnahme der Getriebeteile dient. In diesem Montageblock ist auch das obere Kugellager der Hauptrotationswelle integriert. Auf eine Beschreibung dieses Lagers

kann hier verzichtet werden, weil es mit dem in Abschnitt 3.2.3.2 beschriebenen Lager vom Aufbau her identisch ist.

Das äußere, vakuumdichte Gehäuse des Getriebekastens ist aus Rohrmaterial mit 100 mm Nennweite und 2 mm Wandstärke gefertigt. An beiden Enden ist ein CF-Flansch NW 100 angeschweißt. Unten erfolgt die Verbindung mit dem umgebauten Blindflansch, oben schließt ein handelsüblicher CF-Blindflansch NW 100 die Apparatur ab. An dieser Stelle könnte jedoch auch der Anschluß einer Zusatzpumpe erfolgen bzw. die Anflanschung anderer Zusatzteile ist möglich. Seitlich sind am Gehäuse 3 Rohrstutzen NW 35 mit CF-Flansch angeordnet, die die Präzisionsdrehdurchführungen aufnehmen. Die Rohrstutzen sind so angeordnet, daß die Mittelachsen der Drehdurchführungen die Hauptachse des Manipulators genau unter 90° schneiden. Die Zentrierung der Durchführungen erfolgt im Befestigungsrohr. Auf den Wellenstümpfen der Durchführungen sind jeweils kleine Kegelräder befestigt. Diese sind im Eingriff mit großen Kegelrädern, die im Zentrum des Getriebekastens angeordnet werden. Alle Kegelradpaare sind gleich in den Abmessungen der Zähne. Sie haben ein Untersetzungsverhältnis von 1:10. Dieses Verhältnis wurde gewählt, weil die Drehdurchführungen eine Einstellgenauigkeit von 1° haben, die geforderte Genauigkeit für den Manipulator jedoch $0,1^\circ$ beträgt. Die Kegelräder laufen ohne Schmierung. Zur Verbesserung der Gleiteigenschaften ist die Werkstoffpaarung: Kupfer-Berillium/Edelstahl.

Die Anordnung der Kegelradgetriebe ist kritisch in bezug auf die geforderte Genauigkeit. Optimale Laufeigenschaften sind nur möglich, wenn die Teile genau, also innerhalb der zulässigen Toleranzgrenzen, montiert sind. Wenn man die Drehdurchführungen fertig kauft - eine Eigenherstellung wäre zu aufwendig, teuer und unsicher -, ist es nur möglich, diese von außen anzuflanschen. Da sie auf einer Schweißkonstruktion sitzen, sind Toleranzen im Bereich von Zehntelmillimetern das äußerst Erreichbare. Eine solche Toleranz ist aber in bezug auf die gewünschte Genauigkeit zu grob. Bei der Verdrehung der Durchführung um 1° bewegt sich das große Kegelrad um $0,1^\circ$. Dies entspricht auf dem äußeren Umfang des Rades, dessen Durchmesser 70 mm beträgt, einer Strecke von 0,06 mm! Die Montagetoleranzen müssen also im Hundertstel-Millimeterbereich liegen.

Es ist an dieser Stelle sinnlos, Fertigungstoleranzen anzugeben, die nicht eingehalten werden können. Vielmehr müssen Vorrichtungen geschaffen werden, die eine genaue Anpassung der Teile während der Montage auf der Grundlage

der bei der Fertigung erzielten Genauigkeit zulassen. Bei einer Einzelanfertigung kann dieser zeitaufwendige Prozeß unter Umständen in Kauf genommen werden.

Bei allen Kegelrädern sind Distanzringe auf die Wellen geschoben, die durch Abdrehen oder Schleifen eine genaue Justierung der Räder ermöglichen. Nachdem also die genaue Plazierung der Räder durch axiale Verschiebung möglich ist, stellt der Wellenschlag der Drehdurchführung noch eine Unsicherheit dar. Der Hersteller gibt einen maximalen Wellenschlag von 0,125 mm am Ende der Welle an. Nun werden in den Manipulator jedoch Durchführungen mit verkürzter Welle eingebaut. Bei diesen ist ein maximaler Wellenschlag von 0,073 mm im Bereich des Kegelrades zu erwarten. Da dieser Wert noch geringfügig oberhalb der zulässigen Grenze liegt, wurde überlegt, die Welle durch ein zusätzliches Lager vor dem Kegelrad abzustützen. Abgesehen davon, daß ein solches Lager montagetechnisch schwierig anzuordnen wäre, ist die Lagerung einer Welle in drei Punkten überbestimmt. Dies hätte auf die Dauer zu erhöhtem Verschleiß und schließlich noch zu größerer Ungenauigkeit geführt. Die Durchführungswelle ragt also nun frei in den Getrieberaum hinein. Da der angegebene Wellenschlag ein Maximalwert ist, könnte versucht werden, vom Hersteller ausgesuchte Geräte mit besseren Werten zu erhalten.

Das höchstzulässige Drehmoment ist bei der Durchführung mit 5 Nm angegeben. Dieser Wert dürfte bei den minimalen Kräften, die in der Übertragung auftreten, bei weitem nicht erreicht werden.

Auch bei optimaler Anpassung der Kegelräder dürfte ein totes Spiel in der Übertragung unvermeidbar sein. Um dieses Spiel zu beseitigen, sind an den Wellen der großen Kegelräder Spiralfedern angebracht. Diese Federn sorgen immer für eine Vorspannung der Welle, so daß sich die Kegelräder immer an den gleichen Zahnflanken berühren. Die anschließende Seilübertragung ist spielfrei, sofern die Seile genügend gespannt sind. Die Seilrollen für Tilt- und Azimut-Antrieb sind fest mit dem Kegelrad verbunden. Sie haben beide einen Durchmesser von 28 mm. Somit ergibt sich innerhalb des Seiltriebs für die Azimut-Bewegung ein Übersetzungsverhältnis von 1:1, bei der Tilt-Bewegung 1:2. Der Seilspanner für die Tilt-Bewegung ist im oberen Rollenkäfig integriert. Er ist als einfacher Hebel mit Druckfeder ausgelegt. Da sich der Seilweg bei der Tilt-Übertragung nicht ändert, muß diese Spannvorrichtung nur das Seil straff halten und Seilverlängerungen durch Temperaturänderung usw. auffangen.

Die Wellen, auf denen die Azimut- und Tilträder sitzen, sind in trockenlaufenden Edelstahllagern befestigt. Für die Seilrollen wurde die bereits beschriebene Gestaltung gewählt.

Bei der Auslegung der Tilt-Antriebseinheit mußte berücksichtigt werden, daß der Azimut-Seilzug außen daran vorbeigeleitet werden kann. Um den nötigen Abstand zu erzielen, sind noch zwei Umlenkrollen angebracht. Die Seilzüge sind an den beiden Antriebsrollen nicht umlaufend angeordnet, sondern die Seilenden werden jeweils separat in die Rolle hineingezogen und dort unter eine Schraube geklemmt. Auf diese Weise ist eine bessere Spannung der Seile möglich.

Es ist nun noch etwas zur Auslegung der Spiralfedern zu sagen. Benötigt werden Spiralfedern, die einen möglichst langen Federweg haben. Der Federweg muß in jedem Fall größer sein als der für die zugehörige Rotationsbewegung geforderte Winkel, damit auch in der Anfangsstellung bereits eine Spannung vorliegt. Die Federn sind so ausgelegt, daß sie über den gesamten Einstellbereich in der gleichen Richtung spannen. Zum Beispiel liegt die geringste Federkraft bei -90° , die höchste bei $+90^{\circ}$ vor. Wären die Federn so angeordnet, daß in Stellung 0 ein Lastwechsel erfolgt, dann würde in diesem Moment Spiel entstehen, das die Übertragung verfälscht.

Eine flache Federkennlinie wurde angestrebt, damit die Belastung nicht zu stark variiert. Bei der Auslegung mußten wieder Kompromisse eingegangen werden. Da eine Feder mit flacher Kennlinie und großem Weg viele Windungen benötigt, hat sie auch große Abmessungen. Der Platz zur Unterbringung der Feder ist jedoch begrenzt.

Für Tilt- und Azimut-Getriebe konnten gleiche Federn vorgesehen werden, da sich durch die unterschiedlichen Übersetzungen am Seil trotz verschiedener Einstellbereiche der gleiche Bewegungswinkel für das Getriebe ergibt, nämlich 180° . Der Einstellbereich der Hauptrotation beträgt 270° , so daß hier noch eine größere Feder benötigt wird. Diese Feder sollte außerdem eine Kraft kompensieren, die durch die um die Hauptachse beweglich angeordnete Stickstoffleitung aufgebracht wird. Diese Leitung ist als Biegefeder angeordnet, die jedoch wegen der geringen Beweglichkeit des dünnwandigen Rohres nur einen Federweg von 135° in einer Richtung ausführen kann. Das heißt: es muß in der Nullstellung der Hauptrotation ein Lastwechsel stattfinden. Die Kräfte, die durch diese Rohrfeder auf die Rotationsachse ausgeübt wer-

den, sind so groß, daß sie durch eine Feder mit Abmessungen, die die Unterbringung im Getriebekasten zulassen, nicht kompensiert werden können. Infolgedessen muß also die Rohrfeder selbst dafür sorgen, daß das Spiel im Kegelradpaar unterdrückt wird. Unbefriedigend ist dabei jedoch, daß im Bereich der Nullstellung ein Lastwechsel erfolgt. Es muß versucht werden, diesen Punkt bei der Bedienung des Gerätes zu fühlen und dann entsprechend zu berücksichtigen.

Dennoch wurde eine Spiralfeder für einen Federweg von 270° ausgelegt und in die Zusammenstellungszeichnung eingetragen. Diese Feder ist allerdings zusammen mit der Rohrfeder sinnlos, sie würde lediglich den Lastwechselpunkt verschieben. Sie darf nur dann eingebaut werden, wenn es über den Rahmen dieser Arbeit hinaus gelingen sollte, den Kaltkopf doch fest anzuordnen, so daß die Rohrfeder wegfällt.

Im nachfolgenden Abschnitt sind die Berechnungen zur Auslegung der Spiralfedern aufgeführt.

3.2.4.3 Berechnungen

1. Abmessungen am Kegelradgetriebe

Verzeichnis der Formelbuchstaben

a	Zahnbreitenprojektion
b	Zahnbreite
c _p	Kopfspiel
d _{ae}	äußerer Kopfkreisdurchmesser
d _e	äußerer Teilkreisdurchmesser
d _f	Fußkreisdurchmesser
d _i	innerer Kopfkreisdurchmesser
e _p	Lückenweite am Planradteilkreis
g	Innenkegelhöhe
h _{ap}	Zahnkopfhöhe
h _{fp}	Zahnfußhöhe
m _{te}	Stirnmodul an der äußeren Teilkegellänge R _e
R _e	äußere Teilkegellänge
R _p	Planrad-Halbmesser
S _p	Zahndicke auf dem Planrad-Teilkreis
Z	Zähnezahl
Z _p	Planrad-Zähnezahl

α_p	Flankenwinkel
δ	Teilkegelwinkel
δ_a	Kopfkegelwinkel
λ	Zahnbreitenverhältnis
ϑ_a	Kopfwinkel
ϑ_f	Fußwinkel
ψ_p	Zahndickenhalbwinkel

Abmessungen des großen Kegelrades

gegeben: $d_e = 70 \text{ mm}$
 $Z = 100$

$$m_{te} = \frac{d_e}{Z}$$

$$= \frac{70 \text{ mm}}{100}$$

$$m_{te} = 0,7 \text{ mm}$$

=====

$$m = m_p = m_{te}$$

$$\tan \delta = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{100}{10}$$

$$\tan \delta = 10$$

$$\delta = 84,29^\circ$$

=====

$$R_e = \frac{d_e}{2 \cdot \sin \delta}$$

$$= \frac{70 \text{ mm}}{2 \cdot \sin 84,29^\circ}$$

$$R_e = 35,17 \text{ mm}$$

=====

$$Z_p = \frac{Z}{\sin \delta}$$

$$= \frac{100}{\sin 84,29}$$

$$Z_p = 100,4987$$

=====

$$\psi_P = \frac{S_P}{2 \cdot R_P}$$

$$= \frac{1,0996 \text{ mm}}{2 \cdot 35,17 \text{ mm}}$$

$$\hat{\psi}_P = 0,0156$$

$$\psi_P = 0,8957^\circ$$

$$=====$$

$$b = \lambda \cdot m$$

$$\lambda \approx 15$$

$$b = 8 \text{ mm (festgelegt)}$$

$$c_P = 0,2 \cdot m$$

$$= 0,2 \cdot 0,7 \text{ mm}$$

$$c_P = 0,14 \text{ mm}$$

$$=====$$

$$\tan \varphi_f = \frac{m + c_P}{R_e}$$

$$= \frac{0,7 \text{ mm} + 0,14 \text{ mm}}{35,17 \text{ mm}}$$

$$\tan \varphi_f = 0,0239$$

$$\varphi_f = 1,368^\circ$$

$$=====$$

$$\tan \varphi_a = \frac{m}{R_e}$$

$$= \frac{0,7 \text{ mm}}{35,17 \text{ mm}}$$

$$\tan \varphi_a = 0,0199$$

$$\varphi_a = 1,14^\circ$$

$$=====$$

$$S_P = \frac{m_{te} \cdot \pi}{2}$$

$$= \frac{0,7 \text{ mm} \cdot \pi}{2}$$

$$S_P = 1,0996 \text{ mm}$$

$$R_P = \frac{Z_P \cdot m_{te}}{2}$$

$$= \frac{100,4987 \cdot 0,7 \text{ mm}}{2}$$

$$R_P = 35,17 \text{ mm}$$

$$d_{ae} = d_e + 2m \cdot \cos \delta$$

$$= 70 \text{ mm} + 2 \cdot 0,7 \text{ mm} \cdot \cos 84,29^\circ$$

$$d_{ae} = 70,14 \text{ mm}$$

=====

$$d_f = d_e - 2(m+c_p) \cos \delta$$

$$= 70 \text{ mm} - 2(0,7 \text{ mm} + 0,14 \text{ mm}) \cos 84,29^\circ$$

$$d_f = 69,83 \text{ mm}$$

=====

$$\delta_a = \delta + \psi_a$$

$$= 84,29^\circ + 1,14^\circ$$

$$\delta_a = 85,43^\circ$$

=====

$$a = b \cdot \frac{\cos \delta_a}{\cos \psi_a}$$

$$= 8 \text{ mm} \cdot \frac{\cos 85,43^\circ}{\cos 1,14^\circ}$$

$$a = 0,637 \text{ mm}$$

=====

$$d_i = d_{ae} - 2b \cdot \frac{\sin \delta_a}{\cos \psi_a}$$

$$= 70,14 \text{ mm} - 2 \cdot 8 \text{ mm} \cdot \frac{\sin 85,43^\circ}{\cos 1,14^\circ}$$

$$d_i = 54,19 \text{ mm}$$

=====

$$g = \frac{d_i}{2 \tan \delta_a}$$

$$= \frac{54,19 \text{ mm}}{2 \tan 85,43^\circ}$$

$$g = 2,16 \text{ mm}$$

=====

Abmessungen des kleinen Kegelradesgegeben: $Z = 10$

$$m_{te} = 0,7 \text{ mm}$$

$$m = m_P = m_{te}$$

$$\begin{aligned} d_e &= Z \cdot m_{te} \\ &= 10 \cdot 0,7 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\underline{\underline{d_e = 7 \text{ mm}}}$$

$$\begin{aligned} \tan \delta &= \frac{Z_2}{Z_1} \\ &= \frac{10}{100} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tan \delta &= 0,1 \\ \delta &= 5,71^\circ \\ \underline{\underline{\hspace{1.5cm}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_e &= \frac{d_e}{2 \cdot \sin \delta} \\ &= \frac{7 \text{ mm}}{2 \cdot \sin 5,71^\circ} \end{aligned}$$

$$\underline{\underline{R_e = 35,17 \text{ mm}}}$$

$$\begin{aligned} Z_P &= \frac{Z}{\sin \delta} \\ &= \frac{10}{\sin 5,71^\circ} \end{aligned}$$

$$\underline{\underline{Z_P = 100,5092}}$$

$$\begin{aligned} \varphi_P &= \frac{S_P}{2 \cdot R_P} \\ &= \frac{1,0996 \text{ mm}}{2 \cdot 35,178 \text{ mm}} \end{aligned}$$

$$\psi_P = 0,0156$$

$$\underline{\underline{\psi_P = 0,8957^\circ}}$$

$$\begin{aligned} S_P &= \frac{m_{te} \cdot \pi}{2} \\ &= \frac{0,7 \text{ mm} \cdot \pi}{2} \end{aligned}$$

$$S_P = 1,0996 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} R_P &= \frac{Z_P \cdot m_P}{2} \\ &= \frac{100,5092 \cdot 0,7 \text{ mm}}{2} \end{aligned}$$

$$R_P = 35,178 \text{ mm}$$

$$b = \lambda \cdot m$$

$$\lambda \approx 15$$

$$b = 8 \text{ mm (festgelegt)}$$

$$\underline{\underline{\hspace{1cm}}}$$

$$c_p = 0,2 \cdot m$$

$$= 0,2 \cdot 0,7 \text{ mm}$$

$$c_p = 0,14 \text{ mm}$$

$$\underline{\underline{\hspace{1cm}}}$$

$$\tan \varphi_f = \frac{m+c_p}{R_e}$$

$$= \frac{0,7 \text{ mm} + 0,14 \text{ mm}}{35,17 \text{ mm}}$$

$$\tan \varphi_f = 0,0239$$

$$\underline{\underline{\varphi_f = 1,368^\circ}}$$

$$\tan \varphi_a = \frac{m}{R_e}$$

$$= \frac{0,7 \text{ mm}}{35,17 \text{ mm}}$$

$$\tan \varphi_a = 0,0199$$

$$\underline{\underline{\varphi_a = 1,140^\circ}}$$

$$d_{ae} = d_e + 2m \cdot \cos \delta$$

$$= 7 \text{ mm} + 2 \cdot 0,7 \text{ mm} \cdot \cos 5,71^\circ$$

$$d_{ae} = 8,39 \text{ mm}$$

$$\underline{\underline{\hspace{1cm}}}$$

$$\delta_a = \delta + \varphi_a$$

$$= 5,71^\circ + 1,14^\circ$$

$$\underline{\underline{\delta_a = 6,85^\circ}}$$

$$d_f = d_e - 2(m+c_p) \cdot \cos \delta$$

$$= 7 \text{ mm} - 2(0,7 \text{ mm} + 0,14 \text{ mm}) \cdot \cos 5,71^\circ$$

$$d_f = 5,33 \text{ mm}$$

$$=====$$

$$a = b \cdot \frac{\cos \delta_a}{\cos \varphi_a}$$

$$= 8 \text{ mm} \cdot \frac{\cos 6,85^\circ}{\cos 1,14^\circ}$$

$$a = 7,944 \text{ mm}$$

$$=====$$

$$d_i = d_{ae} - 2b \cdot \frac{\sin \delta_a}{\cos \varphi_a}$$

$$= 8,39 \text{ mm} - 2 \cdot 8 \text{ mm} \cdot \frac{\sin 6,85^\circ}{\cos 1,14^\circ}$$

$$d_i = 6,481 \text{ mm}$$

$$=====$$

$$g = \frac{d_i}{2 \cdot \tan \delta_a}$$

$$= \frac{6,481 \text{ mm}}{2 \cdot \tan 6,848^\circ}$$

$$g = 26,98 \text{ mm}$$

$$=====$$

Bezugsprofil nach DIN 867

$$S_p = \frac{m_p \cdot \pi}{2}$$

$$= \frac{0,7 \text{ mm} \cdot \pi}{2}$$

$$S_p = 1,0996 \text{ mm}$$

$$=====$$

$$e_p = S_p$$

$$=====$$

$$\alpha_p = 20^\circ$$

$$=====$$

$$h_{ap} = m_p$$

$$h_{ap} = 0,7 \text{ mm}$$

$$=====$$

$$h_{fp} = m_p + c_p$$

$$= 0,7 \text{ mm} + 0,14 \text{ mm}$$

$$h_{fp} = 0,84 \text{ mm}$$

$$=====$$

2. Berechnung der Spiralfedern

Verzeichnis der Formelbuchstaben

a	Gangabstand
b	Breite des Federbandes
c	Federkonstante
D	Krümmungsdurchmesser
E	Elastizitätsmodul
f	Federweg
h	Dicke des Federbandes
i	Windungszahl
J	Trägheitsmoment (Biegung)
k	Korrekturfaktor für die zulässige Biegespannung infolge Federkrümmung
ℓ	Federlänge (Länge des Federbandes)
M_t	Drehmoment auf der Welle
r_1	Radius der äußersten Windung
r_2	Radius der innersten Windung
W_b	Widerstandsmoment (Biegung)
ψ	Federwinkel
$\sigma_{b\text{zul}}$	zulässige Biegespannung des Federwerkstoffs

Spiralfedern für Azimut- und Tilt-Antrieb

$$f = \psi \cdot r_1 = \frac{M_t \cdot \ell \cdot r_1}{E \cdot J} \quad M_t = \frac{\sigma_b \cdot W_b}{k}$$

$$f \leq \frac{\sigma_{bzul} \cdot W_b \cdot \ell \cdot r_1}{E \cdot J \cdot k} \quad W_b = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$\leq \frac{\sigma_{bzul} \cdot b \cdot h^2 \cdot \ell \cdot r_1 \cdot 12}{E \cdot h^3 \cdot b \cdot 6 \cdot k} \quad J = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$f \leq \frac{\sigma_{bzul} \cdot \ell \cdot r_1 \cdot 2}{E \cdot h \cdot k}$$

$$\sigma_{bzul} = 400 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \text{ (Federstahl 1.4568)}$$

$$\ell = 600 \text{ mm}$$

$$r_1 = 30 \text{ mm}$$

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$$h = 0,5 \text{ mm}$$

$$k = 1$$

$$f \leq \frac{400 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot 600 \text{ mm} \cdot 30 \text{ mm} \cdot 2}{2 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot 0,5 \text{ mm} \cdot 1}$$

$$f \leq 144 \text{ mm}$$

=====

$$f = \psi \cdot r_1$$

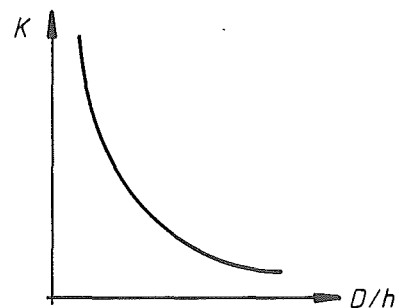
$$\psi = f/r_1$$

$$= \frac{144 \text{ mm}}{30 \text{ mm}}$$

$$\psi = 4,8$$

$$\psi = 275^\circ$$

=====



D/h	K
3	1,28
5	1,17
10	1,07
15	1,04
20	1,04

$$M_{t_{\max}} = \frac{\sigma_{\text{bzul}} \cdot W_b}{k}$$

$$= \frac{\sigma_{\text{bzul}} \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot k}$$

$$\sigma_{\text{bzul}} = 400 \text{ N mm}^{-2}$$

$$b = 6 \text{ mm}$$

$$h = 0,5 \text{ mm}$$

$$k = 1$$

$$M_{t_{\max}} = \frac{400 \text{ N mm}^{-2} \cdot 6 \text{ mm} \cdot (0,5 \text{ mm})^2}{6}$$

$$M_{t_{\max}} = 100 \text{ N mm}$$

=====

$$a = \frac{\pi}{\ell} (r_1^2 - r_2^2)$$

$$\ell = 600 \text{ mm}$$

$$r_1 = 30 \text{ mm}$$

$$r_2 = 10 \text{ mm}$$

$$a = \frac{\pi}{600 \text{ mm}} [(30 \text{ mm})^2 - (10 \text{ mm})^2]$$

$$a = 4,18 \text{ mm}$$

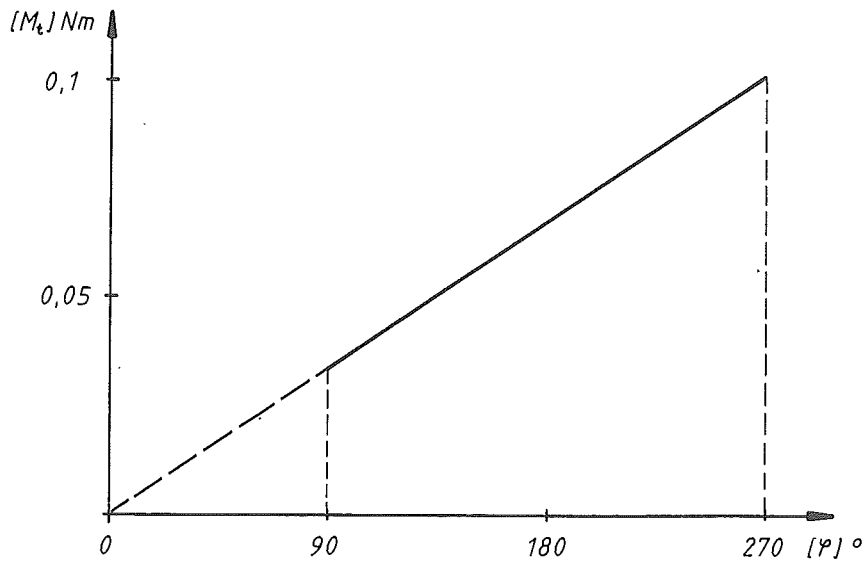
=====

$$i = \frac{\ell}{\pi(r_1 + r_2)}$$

$$= \frac{600 \text{ mm}}{\pi(30 \text{ mm} + 10 \text{ mm})}$$

$$i = 4,77$$

=====

FederkennlinieFederdaten

Federwinkel	180°	Windungszahl	4,7
Vorspannwinkel	90°	Gangabstand	4,18 mm
Drehmoment	0,03-0,1 Nm	Federkonstante	0,4 · 10 ⁻³ Nm·grad ⁻¹
Durchmesser	60 mm	Werkstoff: Edelstahl-Federband;	
Breite	6 mm	1,4568, 6 x 0,5 mm	

Spiralfeder für den Antrieb der Hauptrotation

$$f \leq \frac{\sigma_{bzul} \cdot l \cdot r_1^2}{E \cdot h \cdot k}$$

$$\sigma_{bzul} = 400 \text{ N mm}^{-2}$$

$$l = 1000 \text{ mm}$$

$$r_1 = 40 \text{ mm}$$

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ N mm}^{-2}$$

$$h = 0,5 \text{ mm}$$

$$k = 1$$

$$f \leq \frac{400 \text{ N mm}^{-2} \cdot 1000 \text{ mm} \cdot 40 \text{ mm} \cdot 2}{2 \cdot 10^5 \text{ N mm}^{-2} \cdot 0,5 \text{ mm} \cdot 1}$$

$$f \leq 320 \text{ mm}$$

=====

$$f = \hat{\phi} \cdot r_1$$

$$\hat{\phi} = \frac{f}{r_1}$$

$$= \frac{314 \text{ mm}}{40 \text{ mm}}$$

$$\hat{\phi} = 7,85 \text{ rad}$$

$$\phi = 450^\circ$$

$$M_{t \max} = \frac{\sigma_{bzul} \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot k}$$

$$\sigma_{bzul} = 400 \text{ N mm}^{-2}$$

$$b = 10 \text{ mm}$$

$$h = 0,5 \text{ mm}$$

$$k = 1$$

$$M_{t \max} = \frac{400 \text{ N mm}^{-2} \cdot 10 \text{ mm} \cdot (0,5 \text{ mm})^2}{6}$$

$$M_{t \max} = 166,7 \text{ N mm}$$

$$a = \frac{\pi}{\ell} (r_1^2 - r_2^2)$$

$$\ell = 1000 \text{ mm}$$

$$r_1 = 40 \text{ mm}$$

$$r_2 = 10 \text{ mm}$$

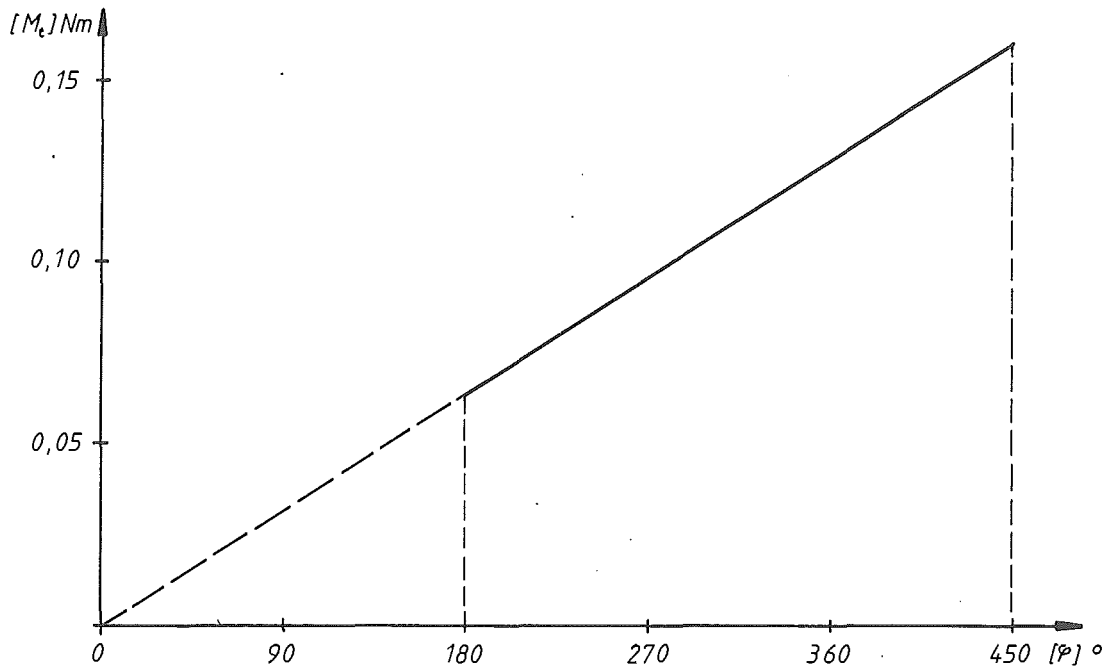
$$a = \frac{\pi}{1000 \text{ mm}} [(40 \text{ mm})^2 - (10 \text{ mm})^2]$$

$$a = 4,7 \text{ mm}$$

$$i = \frac{\ell}{\pi(r_1 + r_2)}$$

$$= \frac{1000 \text{ mm}}{\pi (40 \text{ mm} + 10 \text{ mm})}$$

$$i = 6,36$$

FederkennlinieFederdaten

Federwinkel	270°	Windungszahl	6,4
Vorspannwinkel	180°	Gangabstand	4,7 mm
Drehmoment	0,06 - 0,16 Nm	Federkonstante	$0,4 \cdot 10^{-3} \text{ Nm} \cdot \text{grad}^{-1}$
Durchmesser	80 mm	Federwerkstoff:	Edelstahl-Federband,
Breite	10 mm		1,4568; 10 x 0,5 mm

3.2.4.4 Werkstoffe, Beistellteile und Bezugsquellen

Der Getriebekasten ist weitgehend aus Edelstahl 1.4541 hergestellt. Das Grundmaterial, Rohre, Hohlstähle und Profile aus diesem Material sind im KFA-Lager vorrätig oder können z.B. bei den Mannesmann Edelstahlwerken in Solingen beschafft werden.

CF-Flansche und Zubehör liefern die meisten Firmen der Vakuumtechnik, beispielsweise Leybold-Heraeus in Köln oder Balzers in Liechtenstein. Das Übergangsstück von CF 35 auf CF 100 wird in der KFA aus einem handelsüblichen CF-Blindflansch NW 100 hergestellt. Die UNF-Schrauben Größe 1/4 - 28 liefert die Firma Varian aus Kalifornien, USA. Da für den Manipulator jedoch nur sechs Stück gebraucht werden, können diese wahrscheinlich auch im IGV-Lager abgefaßt werden, wo sie vorrätig sind. Die Firma Varian stellt auch die benötigten Präzisionsdrehdurchführungen her. Das Modell Nr. 981-0539 hat eine Einstellgenauigkeit von $0,1^{\circ}$, ist UHV-tauglich und ausheizbar. Ein Rimenantrieb ist vorgesehen, so daß die Durchführung auch mit Schrittmotor betrieben werden kann. Am Manipulator werden Durchführungen mit kürzeren Wellen benötigt. Nach Möglichkeit sollte die Kürzung der Welle bereits der Hersteller durchführen. Falls das nicht geht, muß diese Arbeit in der KFA gemacht werden. Die Geräte können über die deutsche Varian GmbH in Stuttgart bezogen werden.

Die Kegelhäder muß ein Spezialhersteller fertigen, da dies in der KFA nicht möglich ist. Der Werkstoff, Kupfer-Beryllium für das kleine Rad, Edelstahl 1.4541 für das große, wird angeliefert. Welche Firma den Auftrag erhält, steht zur Zeit noch nicht fest. Die Kupfer-Beryllium-Räder müssen nach der Herstellung noch ausgehärtet werden. Die nachträgliche Bearbeitung von bereits ausgehärtetem Material, zumindest in dem Maße, wie es für die benötigten Kegelhäder erforderlich wäre, ist nicht möglich. Die Härte beträgt 380 - 420 HV! Um die bearbeitete Oberfläche der Räder beim Aushärten nicht zu verändern, muß dies unter Schutzgas (H_2 , Propan) erfolgen.

Das für die Zahnräder benötigte Material ist im Lager von TD-MW vorhanden. Es hat eine Härte von 230 HV. Für diesen Werkstoff ist eine Aushärtezeit von 2 Stunden unter $325^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ erforderlich. Die Abkühlung erfolgt im Ofen. Da es beim Erhitzen gelegentlich zu Verwerfungen durch Freisetzen von Spannungen kommt, müssen die Kegelhäder nach dem Aushärten unbedingt

geprüft werden. Zum Aushärten steht im Zentrallabor für Angewandte Technologie (ZAT) der KFA ein geeigneter Schutzgasofen bereit.

Der Federbandstahl für die Herstellung der Spiralfedern, Werkstoff-Nr. 1.4568, ist bei der Firma Teledyne Rodney-Metals in Sprockhövel zu beziehen. Die Federn werden in der KFA gefertigt.

Die Druckfeder des Tilt-Seilspanners kommt von der Firma Gutekunst & Co. in Metzingen. Sie ist aus Edelstahl 1.4310 gefertigt. Bei einer Federrate von $0,8 \text{ N mm}^{-1}$ kann sie insgesamt eine Kraft von 4,41 aufnehmen.

Die Kugellager für die Wellen der mit Seilrolle kombinierten Kegelräder sind aus Edelstahl; sie können bei der Firma Blässinger in Stuttgart bestellt werden.

Die Reihenfolge der Montage ist dem Kapitel 4 "Montageanweisung für den Manipulator" zu entnehmen.

3.2.5 Kreuzführung für Translationen mit Membranbalg

3.2.5.1 Geforderte Funktion

Das nun zu beschreibende Geräteteil hat die Aufgabe, die gesamte bereits vorgestellte Anordnung in X- und Y-Richtung, also senkrecht zur Mittelachse, zu verschieben. Der Verstellbereich soll für das Experiment mindestens $\pm 12,5 \text{ mm}$ in beiden Richtungen betragen. Da jedoch der Probenhalter etwas größer geworden ist als ursprünglich zugelassen war, muß er eventuell mittels Verstellung der X-Y-Anordnung am Detektor vorbeibewegt werden. Dazu ist ein größerer Einstellbereich der Translationsführung wünschenswert.

3.2.5.2 Anmerkungen zur Aufgabenstellung

Die vertikale Längenausdehnung des Manipulators ist in bezug auf die Anordnung der X-Y-Führung nicht ganz unproblematisch. Der Bewegung wirkt ein relativ großes Trägheitsmoment entgegen, und dabei könnte die Apparatur in sich schwingen, was einer Einstellgenauigkeit nicht gerade entgegenkommt. Dies gilt insbesondere für das Führungsrohr, an dem der Probenhalter in die

Molekularstrahl-Apparatur hineinragt. Einer steiferen Ausführung standen die beengten Platzverhältnisse entgegen.

Nun ist die X-Y-Führung ungefähr im Schwerpunkt der Apparatur angeordnet, der weit oben liegt, weil der Getriebekasten wesentlich massiver aufgebaut ist als das lange, aber leichte Führungsrohr mit Probenhalter. Um eine stabile Führung zu erhalten, müssen die Führungsbahnen so lang wie möglich sein. Hieraus folgt eine entsprechende Breite der Anordnung, die jedoch wieder durch den Aufbau der Führungs- und Antriebselemente der Z-Hubvorrichtung begrenzt wird. Die Hubvorrichtung muß in einer bestimmten Stellung auf den Deckelflansch der Molekularstrahl-Apparatur montiert werden, weil ihre Funktionselemente teilweise in fester Beziehung zur Ausrichtung der Probe stehen, und ein anderer Einbauwinkel die Symmetrie der Versuchsanordnung stören würde.

Begrenzt wird durch die Hubvorrichtung in erster Linie die Y-Translation. Bei einer Führungslänge von maximal 170 mm ist eine Verstellung von ± 15 mm noch möglich. Bei zusammengefahrenener Hubvorrichtung, also in der Stellung, bei der die Probe in der Strahlebene liegt, würde der Y-Schlitten bei noch weiterer Auslenkung an den Führungsaufbau der Z-Verstellung anstoßen.

Aus Symmetriegründen wurde die X-Führung auch nur 180 mm lang ausgeführt. Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 gesagt, übt der verwendete Membranbalg eine erhebliche Kraft in senkrechter Richtung auf die Führung aus, die zwar einerseits von den Führungselementen aufgenommen werden muß, andererseits aber auch zur Stabilisierung beiträgt.

Eine Vergrößerung des Einstellbereichs ist nicht möglich, weil die wenigen auf dem Markt erhältlichen ausheizbaren Einstellmikrometer alle nur einen Bereich von 25 mm haben, außerdem erfordert ein größerer Bereich auch einen längeren Membranbalg.

Ohne die Begrenzung durch die Hubvorrichtung hätte eine breitere Ausführung des X-Y-Schlittens noch den Vorteil, daß die Mittelöffnung größer sein könnte, was die Gestaltung der hindurchragenden Anordnung vereinfachen würde.

3.2.5.3 Beschreibung der Funktionsgruppe

Eine Grundplatte enthält die Vorrichtungen eines CF-Flansches NW 100 mm

zur Montage auf der Z-Hubvorrichtung und hat gleichzeitig Platz zur Aufnahme von drei Stützen, auf denen die X-Y-Kreuzführung angebracht ist. Der gesamte Aufbau ist aus der Zusammenstellungszeichnung Nr. 246.01.01.83 zu ersehen, den Kreuzschlitten speziell zeigt die Gruppenzeichnung Nr. 246.01.01.83-03.

Der Kreuzschlitten besteht aus einer Grundplatte, die die Schrauben der im Dreieck angeordneten Abstützungen aufnimmt und in die gleichzeitig die äußeren Stege der X-Führung integriert sind. Während der eine Steg die prismenförmigen Führungsbahnen enthält, wird auf der anderen Seite eine verstellbare Führungsbahn vorgesehen. Zu diesem Zweck sind in diesem Steg Gewinde zur Aufnahme von Abstands- und Feststellschrauben untergebracht. Mit dieser Anordnung wird der bewegliche Führungssteg justiert. Die Führung ist als Kreuzrollenschlitten gestaltet, bei dem die Wälzkörper immer abwechselnd auf den gegenüberliegenden Führungen abrollen. Die Rollen selbst sitzen in entsprechend gefertigten Rollenkäfigen.

Im Zentrum der Grundplatte befindet sich eine runde Öffnung mit 100 mm Durchmesser. Der bewegliche X-Schlitten hat einen U-förmigen Querschnitt. Auf ihm ist der im Querschnitt ebenfalls U-förmig gestaltete feste Teil der Y-Führung aufgeschraubt. Dieses Teil hat eine Öffnung von 90 mm Durchmesser. Die Bohrung ist kleiner, weil ein durch sie hindurchragendes Teil nur Bewegungen in einer Richtung macht. Es treten nicht wie im unteren Bereich kombinierte X-Y-Verstellungen auf. Die Anordnung des Y-Schlittens ist gleich der des X-Schlittens, nur daß die Führungsbahnen aus Platzgründen 10 mm kürzer sind und der bewegliche Schlitten selbst schmaler ist.

Der obere Teil der Y-Führung hat eine Öffnung von 70 mm Durchmesser. Diese ist als Befestigungsring für einen von unten hineinragenden Stutzen angeordnet. Er wird durch drei Bolzen gesichert. Dieser Stutzen nimmt das lange in die Molekularstrahl-Apparatur hineinragende Führungsrohr auf. Er ist mit dem Edelstahlmembranbalg verschweißt, der die Bewegung in X-Y-Richtung relativ zum unteren feststehenden Montageflansch ermöglicht. Zwischen Membranbalg und Anschlußflansch ist noch ein Rohrstück eingesetzt, das die Durchführungen für Betriebsmittel aufnimmt.

Als Antrieb zur Ausführung der Translationsbewegungen dienen zwei ausheizbare Einstellmikrometer, die seitlich an den Führungen montiert sind. Die Befestigung des Führungsrohres im Stutzen erfolgt so, daß die UNF-Schrauben,

die in dem CF-Übergangsstück sitzen, durch den Stutzen hindurchragen und im Gewinde eines mit dem Führungsrohr verschweißten Abschlußstücks eingeschraubt werden. Auf diese Weise werden alle drei Teile miteinander befestigt. Der Stutzen ist so gestaltet, daß oberhalb des Membranbalges noch eine Abstützung des Führungsrohres erfolgt.

Die nachfolgenden Berechnungen behandeln die Auslegung des Membranbalges sowie die Einwirkung der Balgkraft auf die Führung. Da die Führungsbahnen mit ausgeheizt werden, können sie nicht aus gehärtetem Werkstoff sein, der bei 250 - 300 °C seine Festigkeitseigenschaften ändert. Es wird vielmehr normaler Edelstahl 1.4541 verwendet. Die Berechnungen zeigen, daß als Wälzkörper in diesem Fall nur Rollen in Frage kommen, deren Auflagefläche größer ist als bei Kugeln, so daß die Flächenpressung und somit die Gefahr des Eindrückens in die Führung kleiner wird.

3.2.5.4 Berechnungen

1. Auslegung des Edelstahl-Membranbalges

Die Berechnung erfolgt nach Angaben des Herstellers.

Verzeichnis der Formelbuchstaben

a	für den Luftdruck wirksamer Balgquerschnitt
c_{δ}	Axialfederrate eines Membranpaares
$c_{\delta g}$	Axialfederrate des Balges
c_{λ}	Lateralfederrate eines Membranpaares
$c_{\lambda g}$	Lateralfederrate des Balges
d_1	innerer Balgdurchmesser, Nennweite
d_2	äußerer Balgdurchmesser
f_p	Kraft durch den äußeren Luftdruck
$f_{\delta g}$	axiale Eigenwiderstandskraft des Balges
$f_{\lambda g}$	laterale Eigenwiderstandskraft des Balges
k_a	Tabellenfaktor
k_i	Tabellenfaktor
l_g	Gesamtlänge des Balges
l_s	Einbaulänge
l_w	Länge des Membranpaares
n_w	Anzahl der Membranpaare im Balg

P_{aZ}	für den Balg zulässiger Betriebsdruck
P_b	gegebener Betriebsdruck
P_n	Rechendruck für ein Membranpaar
δ_n	axialer Federweg je Membranpaar
δ_b	axialer Federweg des Balges
λ_n	lateral Federweg je Membranpaar
λ_b	lateral Federweg des Balges

Balgtyp: Hydra Membranbalg, Werkstoff 1.4541
wm 82125

Abmessungen: $d_1 = 82 \text{ mm}$
 $d_2 = 136 \text{ mm}$

geforderter Lateralweg: $\lambda_b = 12,5 \text{ mm} \cdot \sqrt{2}$
 $\lambda_b = 17,7 \text{ mm}$
=====

(erforderlich für gleichzeitige maximale Auslenkung
in X- und Y-Richtung)

$$n_w = \sqrt{\frac{\lambda_b}{\lambda_n \cdot k_i}}$$

$$\lambda_b = 17,7 \text{ mm}$$

$$\lambda_n = 0,044 \text{ mm}$$

$$k_i = 1$$

$$n_w = \sqrt{\frac{17,7 \text{ mm}}{0,044 \text{ mm}}}$$

$$n_w = 20$$

=====

$$\ell_g = n_w \cdot \ell_w$$

$$n_w = 20$$

$$\ell_w = 5,7 \text{ mm}$$

$$\ell_g = 20 \cdot 5,7 \text{ mm}$$

$$\ell_g = 114 \text{ mm}$$

=====

$$P_{a2} = \frac{P_n \cdot k_a \cdot \ell_g}{g + b}$$

$$P_n = 1,4 \text{ bar}$$

$$\ell_g = 114 \text{ mm}$$

$$\lambda_b = 17,7 \text{ mm}$$

$$k_a = 0,93$$

$$P_{az} = \frac{1,4 \text{ bar} \cdot 0,93 \cdot 114 \text{ mm}}{114 \text{ mm} + 17,7 \text{ mm}}$$

$$P_{az} = 1,13 \text{ bar}$$

=====

$$\ell_s = \ell_g - \frac{\delta_n \cdot 0,3 \cdot \lambda_b}{\lambda_n \cdot n_w}$$

$$\ell_g = 114 \text{ mm}$$

$$\delta_n = 4,5 \text{ mm (+ 0,9/- 3,6)}$$

$$\lambda_b = 17,7 \text{ mm}$$

$$\lambda_n = 0,044 \text{ mm}$$

$$n_w = 20$$

$$\ell_s = 114 \text{ mm} - \frac{4,5 \text{ mm} \cdot 0,3 \cdot 17,7 \text{ mm}}{0,044 \text{ mm} \cdot 20}$$

$$\ell_s = 86,8 \text{ mm}$$

=====

(Durch die Vorspannung des Balges auf ℓ_s wird die laterale Beweglichkeit sichergestellt.)

$$c_{\delta g} = \frac{c_\delta}{n_w}$$

$$c_\delta = 74 \text{ N mm}^{-1}$$

$$n_w = 20$$

$$c_{\delta g} = \frac{74 \text{ N mm}^{-1}}{20}$$

$$c_{\delta g} = 3,7 \text{ N mm}^{-1}$$

=====

$$\begin{aligned}
 f_{\delta g} &= c_{\delta g} \cdot \delta_b^{-1} \\
 c_{\delta g} &= 3,7 \text{ N mm}^{-1} \\
 \delta_b &= 114 \text{ mm} - 86,8 \text{ mm} = 27,2 \text{ mm (durch Vorspannung)} \\
 f_{\delta g} &= 3,7 \text{ N mm}^{-1} \cdot 27,2 \text{ mm} \\
 f_{\delta g} &= 100,64 \text{ N} \\
 \underline{\underline{f_{\delta g} &= 100,64 \text{ N}}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_p &= a \cdot p_b \cdot 10 \\
 a &= 95,2 \text{ cm}^2 \\
 p_b &= 1,1 \text{ bar} \\
 f_p &= 95,2 \text{ cm}^2 \cdot 1,1 \text{ bar} \cdot 10 \\
 f_p &= 1047,2 \text{ N} \\
 \underline{\underline{f_p &= 1047,2 \text{ N}}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_{\lambda g} &= \frac{c_{\lambda}}{n_w^3} \\
 c_{\lambda} &= 26000 \text{ N mm}^{-1} \\
 n_w &= 20 \\
 c_{\lambda g} &= \frac{26000 \text{ N mm}^{-1}}{20^3} \\
 c_{\lambda g} &= 3,25 \text{ N mm}^{-1} \\
 \underline{\underline{c_{\lambda g} &= 3,25 \text{ N mm}^{-1}}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{\lambda g} &= c_{\lambda g} \cdot \lambda_b^{-1} \\
 c_{\lambda g} &= 3,25 \text{ N mm}^{-1} \\
 \lambda_b &= 17,7 \text{ mm} \\
 f_{\lambda g} &= 3,25 \text{ N mm}^{-1} \cdot 17,7 \text{ mm} \\
 f_{\lambda g} &= 57,52 \text{ N} \\
 \underline{\underline{f_{\lambda g} &= 57,52 \text{ N}}}
 \end{aligned}$$

Herabsetzen der Lateralkraft: $n_w = 25$

$$\begin{aligned}
 c_{\lambda g} &= \frac{26000 \text{ N mm}^{-1}}{25^3} \\
 c_{\lambda g} &= 1,66 \text{ N mm}^{-1} \\
 \underline{\underline{c_{\lambda g} &= 1,66 \text{ N mm}^{-1}}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{\lambda g} &= 1,66 \text{ N mm}^{-1} \cdot 17,7 \text{ mm} \\
 f_{\lambda g} &= 29,45 \text{ N} \\
 \underline{\underline{f_{\lambda g} &= 29,45 \text{ N}}}
 \end{aligned}$$

größere Einbaulänge:

$$l_s = 25 \cdot 5,7 \text{ mm} - \frac{4,5 \text{ mm} \cdot 0,3 \cdot 17,7 \text{ mm}}{0,044 \text{ mm} \cdot 25}$$

$$l_s = 120,7 \text{ mm}$$

=====

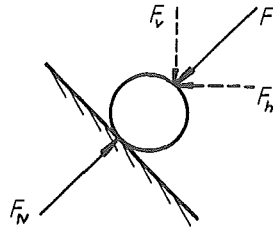
Die Verlängerung des Balges hat den Zweck, die Lateralkraft und damit die Belastung der Einstellmikrometer zu verringern.

Kräfte auf die Führung

vertikal: Gewichtskraft der Aufbauten	$F_G = 100 \text{ N}$
Vorspannkraft für den Balg	$f_{\delta g} = -100 \text{ N}$
Axiale Druckkraft, Luftdruck	$f_p = 1050 \text{ N}$
	<hr/>
Summe	$F_v = 1050 \text{ N}$
	<hr/>

horizontal: Lateralkraft des Balges	$F_n = 30 \text{ N}$
	<hr/>

Belastung der Führungsbahnen durch verschiedene Wälzkörper



$$F_N = F = \frac{F_v + F_h}{\cos 45} \quad (\cos 45 = \sin 45)$$

$$F_v = 1050 \text{ N}$$

$$F_h = 30 \text{ N}$$

$$F_N = \frac{1050 \text{ N} + 30 \text{ N}}{\cos 45}$$

$$F_N = 1527 \text{ N}$$

=====

Verzeichnis der Formelbuchstaben

a	Anzahl der Wälzkörper ^{*)}
E	Elastizitätsmodul
F_N	gesamte, auf die Führung wirkende Normalkraft
F_W	Kraft, die ein Wälzkörper auf die Führung ausübt
l_Z	Länge der Zylinderrolle
r_K	Kugelradius
r_Z	Radius der Zylinderrolle
μ	Poissonsche Pressungsziffer
σ_o	Flächenpressung auf die Führungsbahn (negativ weil Druckspannung)
σ_{zul}	zulässige Druckspannung für die Führungsbahnen

*) Die Anzahl der Wälzkörper teilt sich zur Hälfte auf die beiden Führungsbahnen eines jeden Schlittens auf.

Kugellagerung

$$\sigma_o = - \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{1,5 F_N \cdot E^2}{a \cdot r_K^2 (1-\mu^2)^2}}$$

$$F_N = 1530 \text{ N}$$

$$E = 2,03 \cdot 10^5 \text{ N mm}^{-2}$$

$$a = 36$$

$$r_K = 3 \text{ mm}$$

$$\mu = 0,3 \text{ (für Stahl)}$$

$$\sigma_o = - \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot 1530 \text{ N} \cdot (2,03 \cdot 10^5 \text{ N mm}^{-2})^2}{36 \cdot (3 \text{ mm})^2 (1-0,09)^2}}$$

$$\sigma_o = -2248 \text{ N mm}^{-2} \text{ (36 Kugeln mit 6 mm Durchmesser)}$$

=====

$$a = 28$$

$$r_K = 4,5 \text{ mm}$$

$$\sigma_o = -\frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot 1530 \text{ N} \cdot (2,03 \cdot 10^5 \text{ N mm}^{-2})^2}{28 \cdot (4,5 \text{ mm})^2 \cdot (1-0,09)^2}}$$

$$\sigma_o = -1866 \text{ N mm}^{-2} \text{ (28 Kugeln mit 9 mm Durchmesser)}$$

Bei dieser Anordnung müßte die Führungsbahn jeweils mindestens 140 mm lang sein. Die auftretenden Druckspannungswerte liegen jedoch viel zu hoch, da die Führung höchstens mit $\sigma_{zul} = 200 \text{ N mm}^{-2}$ belastet werden sollte.

Rollenlagerung

$$\sigma_o = -\sqrt{\frac{F_N \cdot E}{a \cdot 2\pi r \ell (1-\mu^2)}}$$

$$F_N = 1530 \text{ N}$$

$$E = 2,03 \cdot 10^5 \text{ N mm}^{-2}$$

$$a = 20$$

$$r_Z = 3 \text{ mm}$$

$$\ell = 6 \text{ mm}$$

$$\mu = 0,3 \text{ (für Stahl)}$$

$$\sigma_o = -\sqrt{\frac{1530 \text{ N} \cdot 2,03 \cdot 10^5 \text{ N mm}^{-2}}{20 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 3 \text{ mm} \cdot 6 \text{ mm} (1-0,09)}}$$

$$\underline{\underline{\sigma_o = -388 \text{ N mm}^{-2} \text{ (20 Rollen mit Durchmesser 6 mm)}}}$$

$$a = 20$$

$$r_Z = 4,5 \text{ mm}$$

$$\ell = 9 \text{ mm}$$

$$\sigma_o = -\sqrt{\frac{1530 \text{ N} \cdot 2,03 \cdot 10^5 \text{ N mm}^{-2}}{20 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 4,5 \text{ mm} \cdot 9 \text{ mm} (1-0,09)}}$$

$$\underline{\underline{\sigma_o = -258 \text{ N mm}^{-2}}}$$

Für die Anordnung von 10 Rollen je Führungsbahn wird eine Länge von 140 mm benötigt. Da die auftretende Druckspannung noch zu hoch liegt, wurde die Führung noch so weit verlängert, wie es die Platzverhältnisse zulassen, um mehr Rollen unterzubringen.

Abgesehen davon ist auch das Verhalten der Führung beim Ausheizen nicht exakt vorausberechenbar. In TD-MW wurde deshalb bisher bei ähnlichen Anordnungen die Führung erst nach dem Ausheizen und Bewegen unter Belastung endgültig eingestellt, nachdem sich die Führungsbahnen eingelaufen und dabei verfestigt haben.

3.2.5.5 Werkstoffe, Beistellteile und Bezugsquellen

Der Anschlußflansch, der zur Montage auf die Hubvorrichtung dient, ist eine Sonderanfertigung, die in der KFA aus 1.4541 hergestellt wird. Er dient gleichzeitig zur Aufnahme der Stützen.

Der Edelstahl-Membranbalg wird von der Firma Witzenmann GmbH, Metallschlauchfabrik, Pforzheim, in den berechneten Abmessungen geliefert. Die Firma schweißt den Balg auch mit den Anschlußstücken zusammen, die zu diesem Zweck eingeschickt werden müssen. Der Balg ist aus Edelstahl 1.4541.

Während die Führungsbahnen des Kreuzschlittens aus 1.4541 in der KFA gefertigt wird, können die Rollen und Rollenkäfige von der Firma Schneeberger in Höfen/Enz bezogen werden. Die Käfige sind aus Messing, die Rollen aus rostfreiem Stahl. Ihre Härte beträgt 60 - 66 HRC.

Über ausheizbare Einstellmikrometer wurden von den Firmen Varian in Stuttgart und Vacuum Generators in Wiesbaden Angebote eingeholt. Es handelt sich dabei jeweils um Einstellschrauben, die auch an den X-Y-Z-Manipulatoren dieser Hersteller montiert sind. Beide Geräte haben einen Einstellbereich von 25 mm.

Alle übrigen Teile der Baugruppe werden aus Edelstahl 1.4541 in der KFA gefertigt und montiert.

12

10

8

7

6

5

4

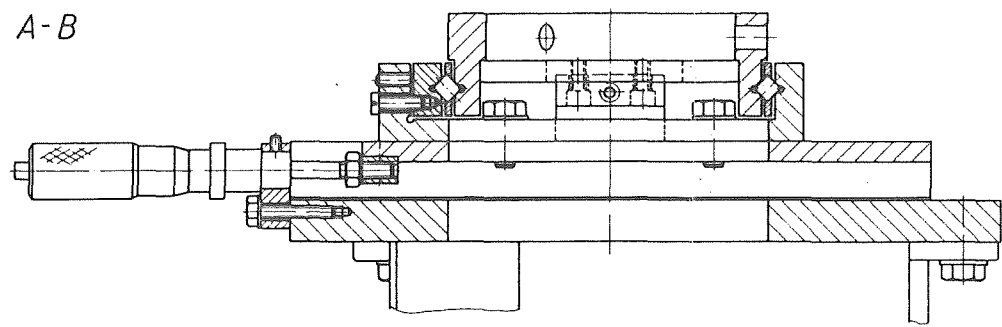
2

1

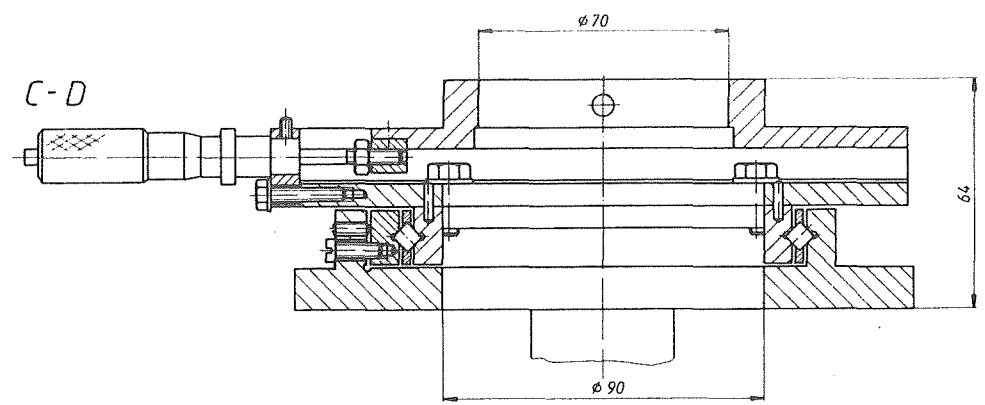
Diese Pause unterliegt - nicht - dem Änderungsdienst

Für diese Zeichnung beanspruchen wir alle Urheberrechte auch für den Fall der Patentanmeldung oder Gebrauchsmusteranmeldung. Vervielfältigung oder Weitergabe an Dritte nur nach unserer vorherigen Zustimmung.

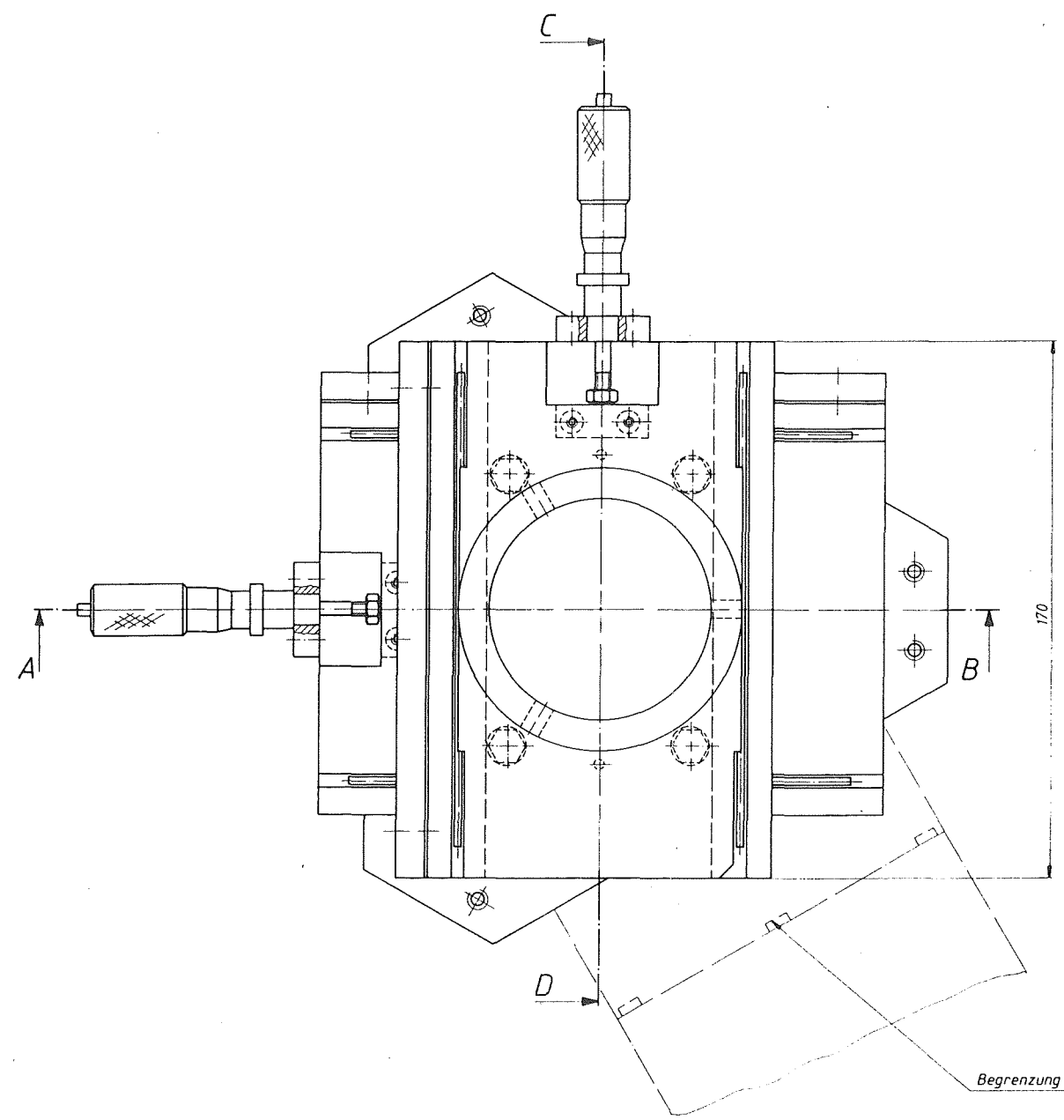
A-B



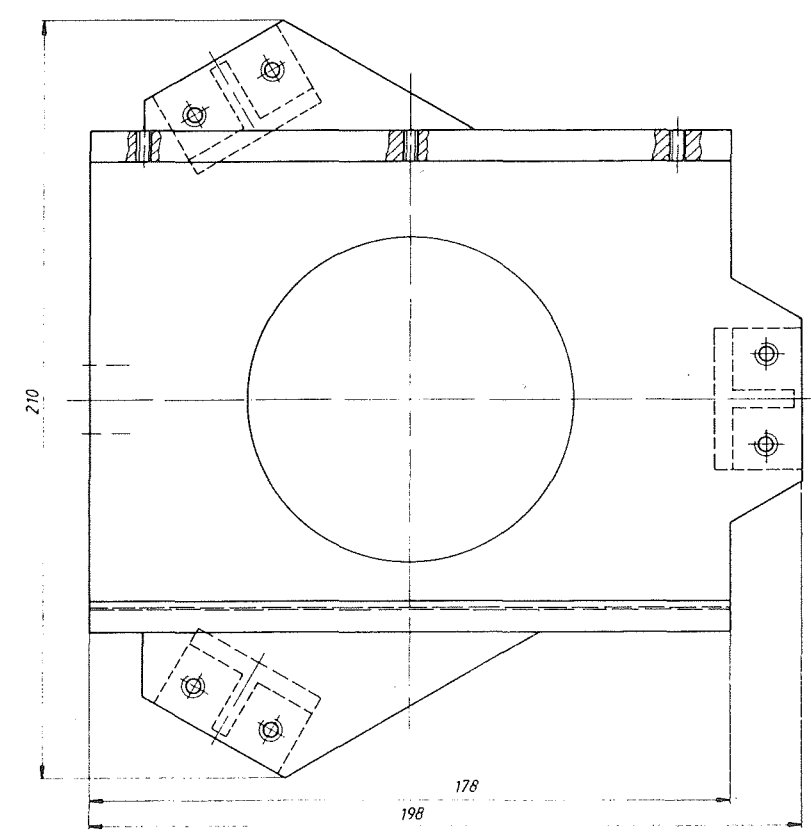
C-D



C



Draufsicht der Grundplatte



Begrenzung durch die Hubvorrichtung

Scharfe Kanten 0,4 gebrochen										Auftrags-Nr				10 49 17				Benennung				Maßstab	
Oberflächen Reihe 2 DIN 3141														1983		Tag		Name		Kreuzschlitten 			

3.2.6 Zu- und Ableitungen für Betriebsmittel mit Vakuum-Durchführungen

3.2.6.1 Anforderungen

Über geeignete Einrichtungen muß es möglich sein, den Kaltkopf mit flüssigem Stickstoff und die Heizung mit elektrischem Strom zu versorgen. Die Einführung dieser Betriebsmittel erfolgt am Manipulator unterhalb des X-Y-Membranbalges. Dort müssen geeignete Vakuumdurchführungen angeordnet sein. Einige zusätzliche Rohrstutzen sollen zur Aufnahme von Meßleitungsdurchführungen vorgesehen werden. Da sich der Kaltkopf um die Hauptachse dreht, die Heizung die Rotation um die Hauptachse sowie die Tilt-Bewegung mitmacht und beide Einrichtungen den Translationsbewegungen folgen müssen, ist eine bewegliche Anordnung der Zuleitungen erforderlich.

3.2.6.2 Ausführung

Die Heizungszuleitung ist eine flexible Kupferlitze mit 5 bis 7 mm² Querschnitt. Als UHV-taugliche Isolation dient ein Glasfasergewebeschauch. Diese Leitung ist so flexibel, daß sie - locker um das Führungsrohr gelegt - allen auftretenden Bewegungen folgen kann. Am Probenhalter wird sie in die vorgesehenen Kabelschuhe geklemmt, am Ende ist sie an einer handelsüblichen UHV-Stromdurchführung angelötet. Es wurden für beide Leitungen getrennte Hochstrom-Durchführungen vorgesehen.

Die Stickstoff-Leitung ist ein dünnwandiges Edelstahlrohr aus 1.4541, Wandstärke 0,2 mm. Rohrdurchmesser 2 mm für die Zuleitung des flüssigen und 4 mm für die Ableitung des gasförmigen Stickstoffes. Die Vakuumdurchführungen, für jede Leitung einzeln, bestehen aus einem dünnwandigen Edelstahlrohr NW 16 mm, das auf der einen Seite an der Wand der Apparatur, am anderen Ende mit dem hindurchragenden Rohr verschweißt ist. Über dieses lange, dünnwandige Rohr aus schlecht wärmeleitendem Material kann ein Temperaturausgleich nicht so schnell erfolgen. Von der Durchführung aus laufen die Leitungen über eine Länge von ca. 520 mm unbefestigt, bevor sie mittels einer Keramik-Halterung am Führungsrohr des Manipulators fixiert werden. Auf der freien Strecke können sie durch Biegung die Bewegung der Translationsführung aufnehmen.

Aus Montagegründen ist dann ein Kupplungsstück vorgesehen. Um der Drehung um die Hauptachse zu folgen, ist die Leitung nun zu einer Biegefeder ge-

formt. Zwanzig Windungen für den großen Rohrquerschnitt und zwölf für den kleinen ermöglichen es, daß die Leitung einer Drehung von maximal 135° in beiden Richtungen von der Nulllage aus folgen kann. Es handelt sich dabei um eine elastische Biegung. Die Auslegung der Rohrfeder folgt im nächsten Abschnitt. Das feste und bewegliche Ende der Feder wird von zwei Keramikhaltern geführt. Der obere sitzt auf dem Führungsrohr, der untere, der die Feder auch abstützt, ist an der drehbaren Hohlwelle befestigt. Eine weitere Abstützung der Leitung, die dann den Kaltkopf auch trägt, befindet sich am Rollenkäfig für die Seilzüge.

Diese Anordnung der Stickstoffleitung ist ein Kompromiß, weil die bessere Lösung, den Kaltkopf ganz stationär anzuordnen, nicht realisiert werden konnte. Die Nachteile, die durch diese Anordnung in bezug auf die Übertragung der Hauptrotation entstehen, wurden schon in Abschnitt 3.2.4.2 besprochen. Es bleibt zu hoffen, daß sich nachträglich in der Praxis doch eine Möglichkeit findet, den Kaltkopf fest zu montieren.

3.2.6.3 Berechnung

Gewundene Biegefeder aus Rohrmaterial

Verzeichnis der Formelbuchstaben

a	Länge der Federenden
D	Federdurchmesser
E	Elastizitätsmodul
f	Federweg
F	erforderliche Biegekraft
i	Windungszahl
J	Trägheitsmoment (Biegung)
ℓ	Federlänge (Länge des gebogenen Rohres)
M_1	Torsionsmoment der Welle
r	Federradius
R	Neutrale Faser der Rohrwand
S	Rohrwanddicke
W_b	Widerstandsmoment (Biegung)
ϕ	Biegewinkel
σ_b	Biegespannung
σ_{bzul}	zulässige Biegespannung

$$f = r \cdot \phi$$

$$J = \pi \cdot s \cdot R^3$$

$$\ell = i \cdot \pi \cdot D + 2a$$

$$W_b = \pi \cdot s \cdot R^2$$

$$F = \frac{W_b \cdot \sigma_b}{r}$$

$$M_t = W_b \cdot \sigma_b$$

$$f = \frac{F \cdot \ell \cdot r^2}{E \cdot J}$$

$$r \cdot \hat{\phi} = \frac{W_b \cdot \sigma_b \cdot (i \cdot \pi \cdot D + 2a) \cdot r^2}{r \cdot E \cdot J}$$

$$r \cdot \hat{\phi} = \frac{\pi \cdot s \cdot R^2 \cdot \sigma_b \cdot (i \cdot \pi \cdot D + 2a) \cdot r^2}{r \cdot E \cdot \pi \cdot s \cdot R^3}$$

$$\sigma_b = \frac{\hat{\phi} \cdot r^2 \cdot E \cdot \pi \cdot s \cdot R^3}{(i \cdot \pi \cdot D + 2a) \cdot r^2 \cdot \pi \cdot s \cdot R^2}$$

$$\sigma_b = \frac{\hat{\phi} \cdot E \cdot R}{i \cdot \pi \cdot D + 2a}$$

kleines Rohr:

$$\phi = 135^\circ$$

$$\hat{\phi} = 2.3562 \text{ rad}$$

$$E = 2,03 \cdot 10^5 \text{ N mm}^{-2}$$

$$R = 0,9 \text{ mm}$$

$$i = 12$$

$$D = 66 \text{ mm}$$

$$a = 33 \text{ mm}$$

$$\sigma_b = \frac{2,3562 \cdot 2,03 \cdot 10^5 \text{ N mm}^{-2} \cdot 0,9 \text{ mm}}{12 \cdot \pi \cdot 66 \text{ mm} + 2 \cdot 33 \text{ mm}}$$

$$\sigma_b = 168,5 \text{ N mm}^{-2}$$

=====

großes Rohr

$$R = 1,9 \text{ mm}$$

$$i = 20$$

$$D = 80 \text{ mm}$$

$$a = 40 \text{ mm}$$

$$\sigma_b = \frac{2,3562 \cdot 2,03 \cdot 10^5 \text{ N mm}^{-2} \cdot 1,9 \text{ mm}}{20 \cdot \pi \cdot 80 \text{ mm} + 2 \cdot 40 \text{ mm}}$$

$$\sigma_b = 177 \text{ N mm}^{-2}$$

=====

$\sigma_{bzul} = 196 \text{ N mm}^{-2}$ für Edelstahl 1.4541, unter Berücksichtigung des Temperaturfaktors.

Die Biegefähigkeit und erforderliche Elastizität für diesen Zweck wurde in einem praktischen Versuch überprüft.

3.2.6.4 Werkstoffe, Beistellteile und Bezugsquellen

Alle benötigten Leitungsmaterialien und der Isolierschlauch sind im KFA-Lager vorrätig. Die Strom- und Meßleitungsdurchführungen liefert die Firma Leybold-Heraeus in Köln, Bei den Isolierteilen aus Keramik wird Macor-Glaskeramik aus der Schweiz verwendet.

Das Biegen der Rohrfedern muß über einen vorher gefertigten Dorn aus Aluminium erfolgen. Da der Biegeradius relativ klein ist, kann das Rohr vorher mit Salz gefüllt werden, das jedoch später dann wieder herausgespült werden muß.

4 MONTAGEANLEITUNG FÜR DIE GESAMTE APPARATUR

Nachdem der Manipulator bisher in allen Einzelheiten beschrieben wurde, soll nun noch eine kurze Anweisung folgen, die in groben Schritten die Reihenfolge der Montage beschreibt. Positionsnummern nach Zeichnung Nr.

246.01.01.83.

1. Aufschrauben der Stützen (24) auf den Grund und Montageflansch (27), den die Firma Witzenmann, Pforzheim, vorher mit dem Membranbalg (30) und dem darauffolgenden Stutzen (31) zur Aufnahme des Führungsrohres (22) verschweißt hat.
2. Aufsetzen und Verschrauben des vormontierten Kreuzschlittens (33). Die endgültige Justierung der Führungen erfolgt erst nach dem Evakuieren (Belastung der Führung) und Ausheizen. Der Rohrstutzen (31) oberhalb des Membranbalges muß in die Kreuzführung hineinragen und wird am oberen Ring durch drei Bolzen gesichert.
3. Einführen des oberen Abschnitts der Stickstoffleitungen (29) in die Apparatur und Verschweißen der Durchführungen (28).
4. Mit oberem Abschlußstück verbundenes Führungsrohr von unten in die Anordnung hineinschieben und von oben mit dem CF-Flansch-Übergangsstück NW 35 auf NW 100 und dem Haltestutzen (31) mit Hilfe von 6 UNF-Schrauben 1/4-28 (32), Länge 50 mm, verschrauben.
5. Auf das Führungsrohr (22) werden von unten die Keramikhalter (19) für die Stickstoffleitung aufgesteckt.
6. Einführung der Hohlwelle (16) von unten in das Führungsrohr (22). In die Hohlwelle sind bereits die beiden Seilzüge für Azimut- und Tiltantrieb lose eingeführt. Das untere Lager der Welle (15) wird vormontiert und am Führungsrohr befestigt. Die endgültige Justierung des Lagers erfolgt erst, wenn auch das Gegenlager montiert ist. Um eine Beschädigung des Lagers zu vermeiden, müssen die Einzelteile nur ganz lose miteinander verschraubt sein.

7. Es werden nun die Rohrfedern (14), (17) aufgesteckt. Nachdem die beiden Rohrstücke verbunden sind, können die Keramikhalter (19) befestigt werden. Die Rohrfedern für Zu- und Ableitung sind ineinander angeordnet. Nachdem auch der untere Keramikhalter (13) an der Hohlwelle befestigt wurde und die Abstützung, die auf dem Rollenkäfig sitzt, aufgesteckt ist, kann die Leitung (7) mit dem Kaltkopf (6) verlötet werden. Die genaue Ausrichtung des Kaltkopfes erfolgt später durch Verbiegen der Leitungen.
8. Aufstecken und Befestigen der bereits zusammengesetzten Getriebeeinheit, an der auch der Probenhalter (4) schon montiert ist. Die Seilzüge, die ja nicht zu einem Ring verbunden sind, sondern deren Enden später an den Antriebsrollen (44) untergeklemmt werden, können bereits lose über die vorgesehenen Umlenkrollen gelegt werden. Die Kaltkopf-Litze (5) wird an der Probenplatte (2) befestigt, und die Heizungszuleitungen (21) kommen an die vorgesehenen Klemmen. Die Kabel können nun - wie in der Zusammenstellungszeichnung angedeutet - verlegt und an den Stromdurchführungen (25) angelötet werden.
9. Es erfolgt nun noch die Montage des Getriebekastens. Dazu wird zunächst der innere Montagekäfig (39), der die feinmechanischen Elemente aufnimmt, auf die Flanschplatte aufgeschraubt. Dabei ist zu beachten, daß Schrauben mit einer axialen Bohrung verwendet werden, da die Gewinde-Sacklöcher nicht anders entlüftet werden können.
10. In den Montagekäfig (39) wird nun zuerst das obere Wellenlager (34), das hier teilweise integriert ist, komplettiert. Dazu werden zuerst die Kugeln des unteren Lagerkranzes eingefüllt, dann folgt das auf der Welle sitzende drehbare Führungsteil. Schließlich werden die Kugeln des oberen Kranzes eingefüllt, und zum Schluß wird der obere Deckel aufgeschraubt. Mit diesem Deckel wird das Lager auch justiert. Beide Lager können nun endgültig eingestellt werden. Dazu müssen unten die an der Welle befestigten Teile eventuell noch einmal gelöst werden.
11. Der Getriebekasten wird nun komplett montiert. Zunächst werden Kegelarad (37) und eventuell die Spiralfeder (36) an der Hohlwelle (16) befestigt, dann folgen oberer Rollenkäfig (42) und Tilt-Seilspanner (41) und schließlich kommen die Antriebsteile für Tilt (43) und Azi-

mut (47).

Es sollte nun die äußere Hülle (46) bereits einmal ohne Deckelflansch montiert werden, damit die genaue Position der Drehdurchführungsachsen ausgemessen werden kann. Dies könnte eventuell mit optischen Hilfsmitteln, z.B. Laser, geschehen. Nach diesem Ausmessen könnten dann die großen Kegelräder schon genau zentriert und fest eingebaut werden. Die endgültige Anpassung brauchte dann nur noch durch axiale Verschiebung der kleinen Kegelräder (38) auf der Durchführungsachse erfolgen.

Die Montage der Spiralfedern geschieht in einer Endlage des Probenkopfes, damit der Vorspann- und Betriebswinkel später stimmt.

12. Vor dem Anpassen und Montieren der Präzisions-Drehdurchführungen (40) sollten die Seile befestigt und gespannt werden. Hierzu und für die vorherige Zentrierung und Montage der Räder kann das äußere Gehäuse (46) wieder abgenommen werden.
13. Nachdem alle inneren Bewegungselemente komplett montiert und funktionsfähig sind, erfolgt die Anpassung und schließlich die Montage der Drehdurchführungen (40). Dabei ist die Position des Probenhalters auf die Einstellskalen der Durchführungen abzustimmen. Die Drehachsen stehen voraussichtlich nicht in Nullstellung, da ihnen durch die Federn, die bisher noch keinen Gegenhalt haben, eine Position aufgezungen wird.
14. Nach Aufsetzen des Deckelflansches kann die Apparatur auf einen Versuchs-Rezipienten montiert und zur Probe evakuiert und ausgeheizt werden. Danach sind je nach Ergebnis des Probelaufs endgültige Einstellarbeiten oder Reparaturen durchzuführen.

5 AUSHEIZANWEISUNG

Da es sich bei diesem UHV-Manipulator um ein kompliziertes feinmechanisches Gebilde handelt, müssen beim Ausheizen einige Punkte beachtet werden.

Das Gerät ist für eine Temperatur von maximal 250 °C ausgelegt. Höhere Temperaturen könnten vor allen Dingen den Lagern schaden. Es muß darauf geachtet werden, daß sich die ganze Apparatur gleichmäßig erwärmt. Entsteht beispielsweise durch zu schnell ansteigende Temperatur ein Unterschied, so daß äußere Teile wärmer sind als innenliegende, so entstehen Spannungen, die zur Beschädigung bestimmter Teile führen.

Die Temperatur darf beim Aufheizen maximal um 50 °C pro Stunde gleichmäßig ansteigen. Die Temperatur muß im gesamten Ausheizkasten gleich hoch sein. Die maximale Erwärmung darf 250 °C nicht überschreiten. Der Abkühlvorgang muß ebenso langsam erfolgen wie das Aufheizen.

Nach dem Ausheizen müssen alle Funktionselemente überprüft werden.

6 LITERATURHINWEISE

6.1 Lehrbücher und Nachschlagwerke

Beitz, W.; Küttner, K.H.
Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau
Berlin, Heidelberg, New York, 1981 (14. Aufl.)
Springer-Verlag

Domke, W.
Werkstoffkunde, Werkstoffprüfung
Essen, 1977 (7. Aufl.)
Giradet-Verlag

Hildebrand, S.
Einführung in die feinmechanische Konstruktion
München, 1969
Hanser-Verlag

Hildebrand, S.
Feinmechanische Bauelemente
München, 1978 (3. Aufl.)
Hanser-Verlag

Hildebrand, S.; Krause, W.
Fertigungsgerechtes Gestalten in der Feinwerktechnik
Braunschweig, 1977
Vieweg-Verlag

Hoischen, H.
Technisches Zeichnen
Essen, 1980 (18. Aufl.)
Giradet-Verlag

Pollermann, M.
Bauelemente der Physikalischen Technik
Berlin, Heidelberg, New York, 1972 (2. Aufl.)
Springer-Verlag

Wutz, U.; Adam, H.; Walcher, W.
Theorie und Praxis der Vakuumtechnik
Braunschweig, Wiesbaden, 1982 (2. Aufl.)
Vieweg-Verlag

6.2 Vorlesungen, Seminare, Zeitungsaufsätze

Prof. Bergrath	Konstruktionselemente	WS 79/80 - WS 80/81
	Konstruktionstechnik	SS 81 - WS 81/82
	Technische Kinematik	SS 80 - WS 80/81
Prof. Hoch	Grundlagen der Vakuumtechnik	WS 80/81
	Vakuum- und Kryotechnik	WS 81/82 - SS 82
Prof. Korte	Technische Mechanik, Festigkeitslehre	SS 80

VDI-Bildungswerk Lehrgang Vakuumtechnik
 Lehrgang Kryotechnik

Nuclear Instruments And Methods 153 (1978) 99-104:

J.A. van den Berg; D.G. Armour

"A Bakable UHV, Precision Three-Axis Goniometer"

6.3 DIN-Normen

DIN	780	Modulreihe für Zahnräder
DIN	868	Allgemeine Begriffe und Bestimmungsgrößen für Zahnräder, Zahnradpaare und Zahnradgetriebe
DIN	3966	Angaben über Verzahnungen in Zeichnungen
DIN	3971	Begriffe und Bestimmungsgrößen für Kegelräder und Kegelradpaare
DIN	3998	Benennung von Zahnrädern und Zahnradpaaren
DIN	17224	Federdraht und Federband aus nichtrostendem Stahl
DIN	17440	Nichtrostende Stähle
DIN	46234	Kabelschuhe

6.4 Firmenprospekte

Ahlers, Bremerhafen	Feindrahtseile
Balzers, Fürstentum Liechtenstein	Vakuumtechnik
Barden (USA), München	Präzisionswälzlager
Engelmann, Hannover	Feindrahtseile
Fiberoptic, Spreitenbach, Schweiz	Glaskeramik
Gutekunst, Metzingen	Federn
Haldenwanger, Berlin	Keramikröhrchen
Huntington (England), München	UHV-Technik
Leybold Heraeus, Köln	Vakuumtechnik
Mannesmann, Solingen	Edelstahlrohre
Metallwerk Plansee, Reutte, Österreich	Hochschmelzende Metalle
MPB (USA), Leutkirch	Präzisionswälzlager
RMB, Biel, Schweiz	Präzisionswälzlager
Schneeberger, Höfen/Enz	Translationsführungen
Seeling, Delmenhorst	Feindrahtseile
Vacuum Generators (USA), Wiesbaden	UHV-Technik
Vakuumschmelze, Hanau	Kupfer/Berillium-Legierungen
Varian (USA), Stuttgart	UHV-Technik
Witzenmann, Pforzheim	Edelstahl-Membranbälle

